

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI
ZBORNİK RADOVA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

Izdavač:

Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, Ulica Radmile Matejčić 3

Za izdavača:

Ivana Štimac-Grandić, dekanica

Glavna i odgovorna urednica:

Diana Car-Pušić

Tehnički urednik:

Filip Horvat

Lektorica:

Saša Čohar-Mančić

Urednički odbor:

Gojko Balabanić
Adriana Bjelanović
Saša Čohar-Mančić
Nana Palinić
Vanja Travaš

Adresa Uredništva:

Rijeka, Ulica Radmile Matejčić 3

GRAFIČKO rješenje omota:

Alen Karlović

Tisak:

3 Dreams d.o.o.

Naklada:

200 primjeraka

ISSN 0350-8552

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

ZBORNİK RADOVA

KNJIGA XVIII

Rijeka, 2015.

GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI**ZBORNİK RADOVA
KNJIGA XVIII****Autori:**

Željko ARBANAS	Zvezdana MITRIĆ
Nataša ATANASOVA	Silvija MRAKOVČIĆ
Natalija BEDE	Nermina MUJAKOVIĆ
Ivan DRAŽIĆ	Maroje OBULJEN
Sanja DUGONJIĆ JOVANČEVIĆ	Nevenka OŽANIĆ
Danijel FRKA	Josip PERANIĆ
Sara GRBČIĆ	Ugo PUNIŠ
Vedran JAGODNIK	Josip RUBINIĆ
Sven KALINČEVIĆ	Nina STANIŠIĆ BUKVIĆ
Barbara KARLEUŠA	Srđan ŠKUNCA
Mirna KLOBUČAR	Koraljka VAHTAR-JURKOVIĆ
Nives KLOBUČAR	Andro VEČERINA
Ivica KOŽAR	Domagoj VINCEK
Nika KRAJNOVIĆ	Martina VIVODA PRODAN
Paulo KRMPOTIĆ	Goran VOLF
Ivan KUŠT	Lena VOZILA
Velimir LABINAC	Tin ZRINSKI
Marko LETTICH	Elvis ŽIĆ

PREDGOVOR

U osamnaestoj knjizi Zbornika radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci objavljeno je šesnaest znanstvenih i stručnih radova nastavnika i studenata Fakulteta te drugih znanstvenika i stručnjaka iz područja djelatnosti Fakulteta. U tri rada prikazani su rezultati studentskih diplomskih radova, u tri rada rezultati studentskih završnih radova te je u jednom radu obrađena tema studentskih seminarskih radova, dok je jedan rad rezultat interesa dva studenta za specifičnu temu vezanu uz laboratorijska ispitivanja. Ti su radovi napisani u koautorstvu studenata završnih godina studija i njihovih mentora, odnosno nastavnika. Dva rada obuhvaćaju rezultate istraživanja doktoranada Fakulteta na doktorskom studiju i napisani su u koautorstvu s predmetnim nastavnicima. Jedan je rad rezultat istraživanja docenta Fakulteta u okviru kolegija s dokorskog studija, napisan s predmetnom nastavnicom, kolegicom iz inozemstva. Preostali radovi rezultat su istraživanja i suradnje vanjskih suradnika i stručnjaka. Objavljeni radovi sadržavaju zamjetan udio rezultata koji ranije nisu bili objavljeni. U ovom Zborniku predstavljeni su radovi iz područja hidrotehnike, geotehnike, arhitekture, građevinskih materijala, matematike i zaštite okoliša. Po ujednačenom broju članaka tijekom godina vidljiv je kontinuirani interes autora za objavljivanjem radova u Zborniku.

Zbornik i ove godine izlazi u crno-bijeloj tehnici, a cjelokupni tekst Zbornika, uz originalne ilustracije u boji dostupan je i na priloženom CD-u.

I ove godine, kao i prethodnih, počevši od 2013. zbornici radova Građevinskog fakulteta od knjige XI, dostupni su na mrežnoj stranici Knjižnice Fakulteta <http://www.gradri.uniri.hr/hr/knjiznica.html>.

Sve radove objavljene u Zborniku recenziralo je najmanje dvoje znanstvenika ili stručnjaka iz područja rada po izboru glavne i odgovorne urednice i Uredničkog odbora. Ukupno su u recenziranju radova sudjelovala trideset i tri recenzenta, pretežno izvan i, manjim dijelom, s Fakulteta. Primijenjena je klasifikacija radova prema Univerzalnoj decimalnoj klasifikaciji (UDK) te kategoriziranje na znanstvene i stručne radove. U kategoriji znanstvenih radova objavljena su dva rada kategorizirana kao prethodna priopćenja, a u kategoriji stručnih radova objavljeno je četrnaest radova.

Svi su radovi jezično lektorirani i dodatno provjereni kako bi se uklonile eventualne pogreške. U završnoj provjeri teksta sudjelovalo je ukupno sedamnaest asistenata i docenata, na čemu im i ovom prilikom zahvaljujem.

Na kraju predgovora želim zahvaliti svim autorima radova te svim recenzentima koji su uložili svoje vrijeme, znanje i trud u recenziranje radova. Također, zahvaljujem na suradnji svim članovima Uredničkog odbora koji su aktivno sudjelovali u cijelom procesu pripreme i izrade Zbornika, davali prijedloge i donosili odluke koje su doprinijele kvaliteti ovog izdanja. Zahvaljujem članici Uredničkog odbora prof. Saši Čohar Mančić na trudu i vremenu uloženom u lektoriranje radova. Također, zahvaljujem tehničkom uredniku Filipu Horvatu na vremenu i trudu kojeg je uložio u postizanje potrebnih tehničkih i estetskih standarda ovog izdanja zbornika.

Glavna i odgovorna urednica

Diana Car-Pušić

SADRŽAJ

Sara GRBČIĆ, Nermina MUJAKOVIĆ, Ivan DRAŽIĆ Numerička analiza direktne Gaussove i iterativne Gauss-Seidelove metode kod linearnih sustava s velikim brojem nepoznanica	9
Josip PERANIĆ, Tin ZRINSKI, Nermina MUJAKOVIĆ Valna jednadžba u polarnim koordinatama	21
Silvija MRAKOVČIĆ, Mirna KLOBUČAR, Nika KRAJNOVIĆ Mogućnosti uporabe vapnenog mulja u proizvodnji samoslijegajućeg betona	33
Sven KALINČEVIĆ, Marko LETTICH, Natalija BEDE, Ivica KOŽAR Eksperimentalno određivanje dinamičkog modula elastičnosti mikroarmiranog betona	45
Domagoj VINCEK, Goran VOLF, Barbara KARLEUŠA Idejno rješenje brane Križ potok	57
Goran VOLF, Nataša ATANASOVA Modeliranje uređaja za pročišćavanje otpadnih voda s aktivnim muljem upotrebom ASM1 modela	69
Maroje OBULJEN, Elvis ŽIC, Nevenka OŽANIĆ Određivanje lokalnih koeficijenata gubitaka u cijevnim sustavima pod tlakom	81
Andro VEČERINA, Elvis ŽIC, Nevenka OŽANIĆ Primjena Hardy-Crossove metode u cijevnim sustavima pod tlakom	93
Nives KLOBUČAR, Nina STANIŠIĆ BUKVIĆ, Velimir LABINAC, Mirna KLOBUČAR Primjena norme HRN EN 12056 : 2005 – Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama	105

- Lena VOZILA, Josip RUBINIĆ
Analiza vodnoga režima izvora Kožljak i Plomin..... 117
- Sanja DUGONJIĆ JOVANČEVIĆ, Martina VIVODA PRODAN, Željko ARBANAS, Zvezdana MITRIĆ
**Varijantna rješenja sanacije klizišta Gradišće kraj Samobora
..... 129**
- Ugo PUNIŠ, Vedran JAGODNIK
**Eksperimentalno istraživanje posmičnog ponašanja
krupnozrnatih tala..... 143**
- Srđan ŠKUNCA
**Planiranje i izgradnja prvih višestambenih naselja druge
polovice 20. stoljeća u Rijeci..... 157**
- Danijel FRKA, Srđan ŠKUNCA
**Projekt unaprjeđenja sustava dostave u središtu grada
Rijeke 173**
- Koraljka VAHTAR-JURKOVIĆ, Ivan KUŠT
**Održivo gospodarenje otpadom na otocima - primjer otoka
Krka 187**
- Koraljka VAHTAR-JURKOVIĆ, Paulo KRMPOTIĆ
**Utjecaj eksploatacije tehničko-građevnog kamena na okoliš
na području Primorsko-goranske županije 199**

NUMERIČKA ANALIZA DIREKTNE GAUSSOVE I ITERATIVNE GAUSS-SEIDELOVE METODE KOD LINEARNIH SUSTAVA S VELIKIM BROJEM NEPOZNANICA

NUMERICAL ANALYSIS OF DIRECT GAUSS AND ITERATIVE GAUSS-SEIDEL METHOD FOR SYSTEMS OF LINEAR EQUATIONS WITH LARGE NUMBER OF UNKNOWNNS

Sara Grbčić*, Nermina Mujaković**, Ivan Dražić***

Sažetak

Sustavi linearnih jednadžbi mogu se riješiti direktnim i iterativnim metodama. Odabir optimalne metode ovisi o karakteru sustava koji rješavamo. Prije postupka rješavanja potrebno je dokazati da sustav zadovoljava različite uvjete nužne za provođenje odabrane metode. Na temelju dva primjera sustava linearnih jednadžbi koja smo riješili direktnom Gaussovom metodom i iterativnom Gauss-Seidelovom metodom objasnili smo razliku u rješavanju rijetkih i gustih sustava i predložili bolju metodu po kriteriju točnosti te složenosti i brzini rješavanja algoritma.

Ključne riječi: *sustav linearnih jednadžbi, Gaussov algoritam, direktna metoda, Gauss-Seidelov algoritam, iterativna metoda, vrijeme izvođenja*

Abstract

For solving systems of linear equations direct and iterative methods can be used. The choice of the optimal method depends on the character of the system to be solved.

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: sara.grbcic@uniri.hr

** Odjel za matematiku Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 2, 51000 Rijeka

E-mail: mujakovic@inet.hr

*** Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vukovarska 58, 51000 Rijeka

E-mail: idrazic@riteh.hr

Before solving the system it must be proved that some necessary conditions are satisfied in order to obtain the solution with the chosen method. In this paper two different systems of linear equations were solved using the direct Gauss method and the iterative Gauss-Seidel method and the difference between solving sparse and dense systems was explained. Depending on the system, the optimal method is suggested.

Key words: *system of linear equations, Gauss algorithm, direct method, Gauss-Seidel algorithm, iterative method, solving time*

1. Uvod

Rješavanje konstrukcijskih sustava od davnih dana predstavlja veliki izazov i najiskusnijim svjetskim inženjerima. Prema klasičnoj teoriji elastičnosti koju najčešće koristimo za proračun konstrukcija, veze između naprezanja i deformacija postavljaju se na diferencijalno malom elementu. Ovakav izbor rezultira potrebom rješavanja diferencijalnih jednadžbi s određenim početnim i rubnim uvjetima. Taj matematički model je složen te često ne možemo pronaći egzaktno rješenje, već moramo pronaći alternativni pristup kojim ćemo doći do približnih, ali zadovoljavajućih rješenja. Metoda konačnih elemenata u rješavanju parcijalnih diferencijalnih jednadžbi predstavlja jednu od najpopularnijih numeričkih metoda za proračun građevinskih konstrukcija. Pomoću ove metode problem rješavanja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi svodimo na problem rješavanja linearnog sustava, često s vrlo velikim brojem nepoznanica. Domena parcijalne diferencijalne jednadžbe koja se rješava aproksimira se konačnim brojem čvorova. Nepoznanice dobivenog linearnog sustava predstavljaju pomake čvorova, dok pomake između čvorova određujemo interpolacijskim tehnikama. Nadalje, iz pomaka čvorova možemo odrediti ostale veličine poput unutarnjih sila i naprezanja. Upravo zato je rješavanje sustava linearnih jednadžbi vrlo važna stavka u inženjerstvu jer predstavlja temelj osnovne metode proračuna konstrukcija. Sustavi linearnih jednadžbi mogu se riješiti direktnim metodama koje daju egzaktno rješenje te iterativnim metodama koje daju aproksimativno rješenje. U praksi, aproksimativno rješenje vrlo često zadovoljava zahtjeve na točnost, a ušteda u računalnom vremenu u usporedbi s direktnim metodama je značajna.

U radu je opisana standardna Gaussova metoda eliminacije i detaljno izvedena Gauss-Seidelova iterativna metoda pomoću koje je proces traženja rješenja ubrzan i pojednostavljen, naročito kod tzv. rijetkih (*eng. sparse*) matrica. Navedene metode analiziramo s teorijskog stanovišta, odnosno navodimo uvjete za njihovu implementaciju i dokazujemo konvergenciju Gauss-Seidelove metode. Također, konkretnim numeričkim eksperimentom analiziramo brzinu izvođenja pojedine metode.

2. Sustavi linearnih jednadžbi

Sustav linearnih jednadžbi predstavlja skup jednadžbi sljedećeg oblika:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (1)$$

gdje je $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ matrica, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ vektor nepoznanica, a $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$ vektor slobodnih koeficijenata. Linearni sustav je rješiv, ako postoji bar jedan vektor \mathbf{x} koji zadovoljava sustav (1). U protivnom se sustav zove nerješiv ili nemoguć [1]. U sljedećim razmatranjima zadržati ćemo se samo na sustavima kod kojih je $m = n$ i regularnom matricom sustava. Takvi sustavi se zovu Cramerovi sustavi i imaju jedinstveno rješenje. Rješenje sustava jednadžbi (1) u matricnom obliku glasi:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \quad (2)$$

što znači da rješenje zahtijeva računanje inverzne matrice. Za direktno računanje inverzne matrice višeg reda potrebno je mnogo vremena te su stoga razvijene različite metode rješavanja sustava linearnih jednadžbi koje su jednostavnije i zahtijevaju manje vremena. Razlikujemo direktne metode i iterativne metode. Standardna Gaussova metoda smatra se direktnom metodom rješavanja sustava linearnih jednadžbi i do rješenja se dolazi postupkom eliminacija. Drugu, zasebnu klasu, predstavljaju iterativne metode, poput Gauss-Seidelove metode koja od poznate početne aproksimacije konstruira niz aproksimacija koje konvergiraju ka rješenju.

3. Direktne metode

3.1. Standardna Gaussova metoda eliminacije

Za rješavanje sustava jednadžbi (1) može se primijeniti standardna Gaussova metoda eliminacije. Ideja Gaussova algoritma je prilično jednostavna. Primjenom elementarnih transformacija na matrici \mathbf{A} (zamjena redaka, množenje retka brojem, zbrajanje redaka) dovodimo je do trokutaste forme iz koje uvrštavanjem unazad lako dolazimo do rješenja. Opisani Gaussov algoritam uključuje dijeljenje s elementima na glavnoj dijagonali koji mogu biti numerički problematični te uzrokovati nestabilnost algoritma. Stoga se vrlo često prije dijeljenja na dijagonalu dovodi numerički najpovoljniji element. Taj se element naziva pivotni element, a sam postupak zovemo pivotiranje. Uvjet za provedbu Gaussove metode bez pivotiranja je da u k -tom koraku k -ti dijagonalni element transformirane matrice bude različit od nule.

U nastavku su dani izrazi za korak standardne Gaussove metode eliminacije. Zadana je kvadratna regularna matrica \mathbf{A} i vektor slobodnih koeficijenata \mathbf{b} :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Sustav je rješiv i ima jedinstveno rješenje. Nužan uvjet za provođenje ove metode je da su svi pivot elementi različiti od nule, odnosno $a_{ii} \neq 0$. U matricama \mathbf{A} i \mathbf{b} članove 1.retka pomnožimo redom s brojevima $-\frac{a_{21}}{a_{11}}, -\frac{a_{31}}{a_{11}}, \dots, -\frac{a_{N1}}{a_{11}}$ i rezultate dodajemo redom 2.-om, 3.-em, \dots , N -tom retku. Elementi matrice $\mathbf{A}^{(2)}$ transformiraju se prema pravilu:

$$a_{ik}^{(2)} = a_{ik} - m_{i1}a_{1k}, \quad b_i^{(2)} = b_i - m_{i1}b_1, \quad (i, k = 2, \dots, N), \quad (4)$$

gdje je $m_{i1} = \frac{a_{i1}}{a_{11}}$. Nakon prve transformacije dobivamo:

$$\mathbf{A}^{(2)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ 0 & a_{22}^{(2)} & \cdots & a_{2N}^{(2)} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & a_{N2}^{(2)} & \cdots & a_{NN}^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}^{(2)} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2^{(2)} \\ \vdots \\ b_N^{(2)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Uz pretpostavku da su svi pivot-elementi različiti od nule, nakon $(N-1)$ koraka matrica \mathbf{A} poprima oblik gornje trokutaste matrice gdje su svi subdijagonalni elementi različiti od nule, a takav se sustav lako rješava povratnom supstitucijom.

Standardna Gaussova metoda eliminacije se još naziva i Gaussovom metodom eliminacije bez pivotiranja, zato što položaj redaka i stupaca ostaje nepromijenjen kroz cijeli algoritam. Algoritam rješavanja sustava linearnih jednačbi kod kojeg se u svakom koraku vodi računa o izboru pivotnog elementa predstavlja modifikaciju standardne Gaussove metode eliminacije. Poznata su Gaussova metoda eliminacije s djelomičnim pivotiranjem i Gaussova metoda eliminacije s potpunim pivotiranjem, gdje se bira pivot element najveće apsolutne vrijednosti, a nakon toga se vrši zamjena redaka i stupaca, ovisno o položaju odabranog pivot elementa [2]. Iako pivotiranje povećava stabilnost algoritma, zbog brojnih zamjena redaka i stupaca njegovim korištenjem se može uvelike povećati vrijeme izvršavanja algoritma.

3.2. Broj potrebnih aritmetičkih operacija standardne Gaussove metode eliminacije

Kako bi izrazili mjeru složenosti Gaussovih eliminacija prebrojiti ćemo sve aritmetičke operacije u algoritmu. Pretpostavimo da je matrica sustava reda N . U prvom koraku imamo $(N-1)$ dijeljenje, $N(N-1)$ množenje i $N(N-1)$ oduzimanje. Ukupno u k -tom koraku imamo:

$$N - k + 2(N - k + 1)(N - k) = 2(N - k)^2 + 3(N - k) \quad (6)$$

aritmetičkih operacija. Kako broj koraka k može poprimiti vrijednost od 1 do $(N - 1)$, sumiranjem dobivamo da je ukupan broj operacija potreban za svođenje na trokutastu formu jednak:

$$\frac{1}{6}(4N^3 + 3N^2 - 7N). \quad (7)$$

Nakon svođenja na trokutastu formu potrebno je provesti povratnu supstituciju kako bismo dobili rješenja sustava jednadžbi koje daje N^2 operacija. Dobivamo da je ukupan broj operacija u Gaussovima eliminacijama jednak:

$$\frac{1}{6}(4N^3 + 9N^2 - 7N). \quad (8)$$

Za veće vrijednosti N broj operacija je približno jednak $\frac{2}{3}N^3$. Na temelju niže analiziranih primjera usporedili smo broj operacija za različiti broj nepoznanica. Vidimo da je za 100 nepoznanica potrebno ukupno 6.81×10^5 operacija, dok je za 100 puta veći broj nepoznanica, odnosno za 10000 nepoznanica potrebno čak milijun puta više operacija, odnosno 6.67×10^{11} operacija.

4. Iterativne metode

U prethodnom poglavlju objasnili smo da je broj računskih operacija kod rješavanja sustava linearnih jednadžbi direktnim metodama reda veličine N^3 . Stoga kod rijetkih matrica (eng. *sparse matrices*) direktne metode rješavanja sustava linearnih jednadžbi nisu preporučljive [3]. Metoda Gaussovih eliminacija često nije pogodna za matrice velikih dimenzija i strukturirane matrice zbog velikog broja potrebnih operacija i dužeg vremena izvođenja istih. Stoga se umjesto direktnih metoda, u praksi često koriste iterativne metode koje daju aproksimativna rješenja. Pretpostavimo da je \mathbf{A} regularna matrica reda N . Iterativna metoda koja pronalazi približno rješenje sustava $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ zadana je početnim vektorom $\mathbf{x}^{(0)}$ i generirana je nizom iteracija $\mathbf{x}^{(m)}$, $m \in \mathbb{N}$, koje konvergiraju prema rješenju linearnog sustava. U trenutku kada su susjedni članovi iz dvije iteracije dovoljno bliski proces iteriranja se zaustavlja. To znači da

$$\|\mathbf{x}^{(m+1)} - \mathbf{x}^{(m)}\| \leq \varepsilon, \quad (9)$$

gdje je ε unaprijed zadana točnost, a $\|\cdot\|$ neka vektorska norma.

4.1. Gauss-Seidelova metoda

Gauss-Seidelova metoda je iterativna metoda koja se koristi za rješavanje sustava linearnih jednačbi. Poznata je i pod nazivom metoda sukcesivnog pomaka. Može se koristiti za sve matrice čiji su dijagonalni elementi različiti od nule, međutim konvergencija je garantirana ukoliko je matrica dijagonalno dominantna ili simetrična i pozitivno definitna. Definirajmo stoga te pojmove.

Definicija 1. Matrica A je dijagonalno dominantna ako vrijedi:

$$|a_{ii}| > \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}|, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

Definicija 2. Za matricu A kažemo da je simetrična i pozitivno definitna ako vrijedi:

$$A = A^T \quad \text{i} \quad x^T A x > 0, \quad (11)$$

gdje je x ($x \neq \mathbf{0}$) bilo koji netrivialni vektor.

Navedimo jedan kriterij za provjeru pozitivne definitnosti [3].

Propozicija 1. (Sylvesterov kriterij) Simetrična matrica je pozitivno definitna ako vrijedi $\det(A_k) > 0$, odnosno ako su svi njezini glavni minori pozitivni.

Izvedimo sada iterativnu formulu za Gauss-Seidelovu metodu. Da bi dobili zapis Gauss-Seidelove iteracije krećemo od sustava jednačbi:

$$Ax = b, \quad \text{gdje je } A \text{ iz Definicije 2.} \quad (12)$$

Sustav (12) zamjenjujemo ekvivalentnim sustavom

$$(D + L + R)x = b, \quad \text{gdje su} \quad (13)$$

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & a_{NN} \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \dots & a_{NN-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ 0 & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & a_{N-1N} \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

s pretpostavkom da je $a_{ii} \neq 0$, $i = 1, 2, \dots, N$. Matrica D je dijagonalna matrica, dok matrice L i R predstavljaju strogo donju i strogo gornju trokutastu matricu [1].

Sustav (13) ekvivalentan je sljedećemu:

$$(\mathbf{D} + \mathbf{L})\mathbf{x} = -\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{b} \Rightarrow (\mathbf{I} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{L})\mathbf{x} = -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{b}. \quad (16)$$

Na osnovu dobivenog izraza, za odabrani početni $\mathbf{x}^{(0)}$, generiramo niz

$$(\mathbf{I} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{L})\mathbf{x}^{(k+1)} = -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{x}^{(k)} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{b}. \quad (17)$$

Prethodni se izraz može napisati u obliku

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = -\mathbf{D}^{-1}(\mathbf{b} - \mathbf{R}\mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{L}\mathbf{x}^{(k+1)}), \quad (18)$$

odnosno raspisano po komponentama

$$x_i^{(k+1)} = -\frac{1}{a_{ii}}(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^N a_{ij}x_j^{(k)}), \quad i = 1, \dots, N. \quad (19)$$

Metoda se sastoji u tome da u aproksimaciji i -te varijable u $(k+1)$ -om koraku koristimo aproksimaciju svih ostalih varijabli iz prethodnog k -tog koraka te vrijednosti koje su u trenutnom koraku već određene. Poredak prolaska kroz jednadžbe sustava je potpuno određen i strogo sekvencijalan. U numerici se često radi s rijetkim sustavima za koje je ova metoda jako povoljna jer ubrzava proces traženja rješenja radi jednostavnog algoritma i neznatne potrebne memorije. Nedostatak metode je što su dijagonalna dominantnost, odnosno pozitivna definitnost vrlo jaki uvjeti za matrice.

4.2. Konvergencija Gauss-Seidelove metode

Kako bi dokazali konvergenciju Gauss-Seidelove metode definirajmo najprije općeniti iterativni postupak:

$$\mathbf{x}^{(m+1)} = \mathbf{Z}\mathbf{x}^{(m)} + \mathbf{c}, \quad m \in \mathbb{N}_0, \quad (20)$$

gdje je $\mathbf{Z} = -(\mathbf{D} + \mathbf{L})^{-1}\mathbf{R}$ iz (14) i (15).

Lema 1. *Ako je $\|\mathbf{Z}\| < 1$, gdje je $\|\cdot\|$ neka matricna norma usklađena s vektorskom, niz iteracija $(\mathbf{x}^{(m)})$, $m \in \mathbb{N}_0$, konvergira ka rješenju linearnog sustava $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$ za sve početne vektore $\mathbf{x}^{(0)}$ i sve desne strane \mathbf{b} .*

Sada ćemo Lemu 1. primijeniti na Gauss-Seidelovu iterativnu metodu (prema [4]).

Teorem 1. *Neka je \mathbf{A} dijagonalno dominantna matrica. Tada je spektralni radijus matrice sustava $\rho(\mathbf{Z}) < 1$ gdje je \mathbf{Z} definirana s (20).*

Neka je λ proizvoljna svojstvena vrijednost matrice $\mathbf{Z} = -(\mathbf{D} + \mathbf{L})^{-1}\mathbf{R}$ s pripadnim svojstvenim vektorom \mathbf{x} . Bez smanjenja općenitosti možemo pretpostaviti da je $\|\mathbf{x}\|_\infty = 1$. Tada vrijedi $-\mathbf{R}\mathbf{x} = \lambda(\mathbf{D} + \mathbf{L})^{-1}\mathbf{x}$, odnosno

$$-\sum_{j>i} a_{ij}x_j = \lambda a_{ii}x_i + \lambda \sum_{j<i} a_{ij}x_j, \quad i = 1, \dots, N, \quad (21)$$

što dalje implicira

$$|\lambda| \leq \frac{\sum_{j>i} |a_{ij}| |x_j|}{|a_{ii}| |x_i| - \sum_{j<i} |a_{ij}| |x_j|} \quad i = 1, \dots, N. \quad (22)$$

Razmatrajući indeks i i jednakost $|x_i| = \|\mathbf{x}\|_\infty = 1$, dobivamo:

$$|\lambda| \leq \frac{\sum_{j>i} |a_{ij}|}{|a_{ii}| - \sum_{j<i} |a_{ij}|} = \frac{\sum_{j>i} |a_{ij}|}{\sum_{j>i} |a_{ij}| + \underbrace{(|a_{ii}| - \sum_{j>i} |a_{ij}| - \sum_{j<i} |a_{ij}|)}_{>0}} < 1. \quad (23)$$

Vrijedi i sljedeći teorem koji ne dokazujemo budući da dokaz zahtjeva poznavanje svojstava Jacobijeve metode koja predstavlja drugu iterativnu metodu [2].

Teorem 2. *Ako je matrica A simetrična i pozitivno definitna, tada Gauss-Seidelova metoda konvergira za svaku početnu iteraciju $\mathbf{x}^{(0)}$.*

5. Primjeri

U nastavku ćemo analizirati dva primjera čija rješenja tražimo direktnom Gaussovom i iterativnom Gauss-Seidelovom metodom. Prije rješavanja sustava potrebno je provjeriti jesu li zadovoljeni uvjeti za dobivanje rješenja kod obje metode. Rješenja dobivamo pomoću algoritma ispisanih u programskim paketima *Mathematica* i *Matlab*. Osnovna razlika ova dva programska paketa je što je *Mathematica* orijentirana na simboličko računanje i nailazi na probleme kod većih sustava jednadžbi, dok programski paket *Matlab* algoritam rješava numerički i razvijen je za rad s matricama. Upravo ova razlika u pristupu rješavanja sustava dovodi do velike razlike u potrebnom vremenu provođenja algoritma, naročito kod rijetkih sustava s velikim brojem nepoznanica. U prvom primjeru analiziramo gusti sustav s 8 nepoznanica i do rješenja dolazimo pomoću programskog paketa *Mathematica*. U drugom primjeru analiziramo nekoliko rijetkih sustava s različitim brojem nepoznanica koji ovisi o broju N . Korištenjem programskog jezika *Mathematica* za male vrijednosti N uspješno dolazimo do rješenja i vrijeme proračuna je u skladu s očekivanim. Međutim, za veće vrijednosti N programski jezik *Mathematica* nailazi na probleme. Simboličko računanje koje programski jezik *Mathematica* koristi rezultira dužim vremenom proračuna korištenjem Gauss-Seidelove metode u odnosu na direktnu, što je suprotno od očekivanog. Također, za vrijednosti $N > 20$ zbog ograničenih performansi računala proračun se prekida. To znači da je za realnu usporedbu vremena proračuna bilo potrebno algoritam ispisati u drugom programskom paketu koji koristi isključivo numeričko računanje, poput programskog jezika *Matlab*.

5.1. Primjer 1

Zadan je sustav od 8 linearnih jednadžbi s 8 nepoznanica:

$$4x_k - \frac{kh^3}{3}(4x_1 + 4x_2 + 12x_3 + 8x_4 + 20x_5 + 12x_6 + 28x_7 + 8x_8) = 4\sin(kh) - kh, \quad (24)$$

$$k = 1, 2, \dots, 8, \quad h = \frac{\pi}{16}.$$

Matrica sustava je pozitivno definitna i dijagonalno dominantna, što osigurava konvergenciju iterativne metode rješavanja. Za dijagonalno dominantne, odnosno simetrične i pozitivno definitne matrice vrijedi da su tijekom provođenja Gaussove eliminacije u svakom koraku svi elementi na dijagonali različiti od nule, što je nužan uvjet za provođenje metode. Utvrđivanjem da su apsolutne vrijednosti dijagonalnih elemenata matrice veće od apsolutne vrijednosti zbroja preostalih elemenata toga reda dokazali smo dijagonalnu dominantnost. Determinante svih glavnih minora matrice koeficijentata su veće od nule, čime smo dokazali i pozitivnu definitnost. Sustav smo prvo riješili direktnom Gaussovom metodom kojom dobivamo točno rješenje. Greška koja se može pojaviti u postupku rješavanja sustava linearnih jednadžbi direktnim metodama je greška koja je nastala kao posljedica zaokruživanja. Računalo pamti samo određeni broj znamenki t . Ako realni broj a ima više od t znamenki, računalo će ga postupkom zaokruživanja ili odbacivanja pretvoriti u t -znamenkasti broj. Dobivena rješenja jednaka su:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.195089 \\ 0.38268 \\ 0.555565 \\ 0.7071 \\ 0.831461 \\ 0.923869 \\ 0.980773 \\ 0.999986 \end{pmatrix} \quad (25)$$

U ovom primjeru dobivamo isti rezultat pomoću sve tri direktne metode (standardnom Gaussovom metodom, Gaussovom metodom s djelomičnim pivotiranjem te Gaussovom metodom s potpunim pivotiranjem), što znači da, iako je došlo do zaokruživanja u postupku proračuna, ono nije utjecalo na rezultat do značajne decimale. Potrebno vrijeme za provođenje cijelog algoritma u programskom paketu *Mathematica* jednako je 0.219 s. Sustav smo riješili i Gauss-Seidelovom metodom iteracije s traženom točnošću od $\varepsilon = 0.1\%$. Dobili smo slijedeća rješenja:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.195081 \\ 0.382666 \\ 0.555547 \\ 0.70708 \\ 0.831445 \\ 0.923856 \\ 0.980765 \\ 0.99998 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Vidimo da dobivena rješenja iterativnom metodom odstupaju od točnih rješenja. Usporedba rezultata i analiza greške prikazana je u Tablici 1.

Tablica 1. Usporedba dobivenih rezultata pri čemu a označava rješenje dobiveno direktnom metodom, a a^* rješenje dobiveno iterativnom metodom te analiza apsolutne i relativne greške

	a	a^*	$\Delta a = a - a^* $	$\delta a = \frac{\Delta a}{ a }$
x_1	0.195089	0.195081	0.745×10^{-5}	3.82×10^{-5}
x_2	0.38268	0.382666	1.42×10^{-5}	3.72×10^{-5}
x_3	0.555565	0.555547	1.76×10^{-5}	3.17×10^{-5}
x_4	0.7071	0.70708	1.98×10^{-5}	2.8×10^{-5}
x_5	0.831461	0.831445	1.56×10^{-5}	1.88×10^{-5}
x_6	0.923869	0.923856	1.31×10^{-5}	1.42×10^{-5}
x_7	0.980773	0.980765	0.713×10^{-5}	0.73×10^{-5}
x_8	0.999986	0.99998	0.592×10^{-5}	0.59×10^{-5}

Potrebno vrijeme za provođenje cijelog algoritma u programskom paketu *Mathematica* jednako je 0.234 s. Odabir optimalne metode ovisi o karakteru i značaju sustava koji rješavamo. S obzirom na složenost ovog sustava ne vidimo velike razlike u vremenu potrebnom za dobivanje rješenja direktnom ili iterativnom metodom; stoga je za rješavanje ovog primjera bolje koristiti direktnu Gaussovu metodu pomoću koje dobivamo točna rješenja. Drugim riječima, za guste sustave povoljnije je koristiti direktnu Gaussovu metodu.

5.2. Primjer 2

Zadan je sustav linearnih jednadžbi $Ax = b$, pri čemu je matrica A dimenzija $N^2 \times N^2$ čiji su svi elementi jednaki 0 osim: $a_{ii} = 4$, $a_{i,i-1} = a_{i,i+1} = a_{i,i+N} = a_{i,i-N} = -1$.

Elementi vektora b također su jednaki 0 osim:

$$b_i = \sin\left(\frac{i\pi}{N+1}\right), \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Razmatramo slučajeve za različite vrijednosti $N=3, 10, 20, 50, 60, 70, 100$.

Za sve vrijednosti N matrica sustava je pozitivno definitna, odnosno determinante svih glavnih minora su veće od nule. Apsolutna vrijednost dijagonalnih elemenata veća je od zbroja preostalih elemenata toga reda, što znači da je matrica i dijagonalno dominantna. Uvjet za provođenje standardne Gaussove metode eliminacije je ispunjen i konvergencija iterativne Gauss-Seidelove metode je garantirana.

Rješavamo sustav direktnom metodom za $N=3$. Potrebno vrijeme za provođenje cijelog algoritma u programskom paketu *Mathematica* jednako je 0.25 s. Ako primjer 2. za $N=3$ rješavamo iterativnim postupkom s točnošću od $\varepsilon = 0.1\%$, do rješenja dolazimo provođenjem cijelog algoritma u programskom paketu *Mathematica* za 0.1 s. Vidimo da je potrebno višestruko manje vremena za rješavanje sustava pomoću iterativne metode u odnosu na direktnu metodu. Za veće vrijednosti N koristili smo programski paket *Matlab*. Usporedba vremena izvođenja operacija za obje metode te omjer zaokružen na cijeli broj prikazan je u Tablici 2.

Vidimo da se za manje vrijednosti N vrijeme izvođenja proračuna razlikuje u redu veličine do 10^{-1} s, što nije značajna razlika, međutim za $N=50$ vidimo da je vrijeme proračuna direktnom metodom gotovo 3 puta veće nego iterativnom metodom. Povećavanjem broja N razlika postaje sve veća. Razlog ovolikoj razlici u vremenu izvođenja je vjerojatno u tome što je kod ovog primjera matrica koeficijenata rijetka.

Tablica 2. Usporedba vremena rješavanja sustava direktnom metodom i iterativnom metodom u programskom jeziku *Matlab*

N	Direktna metoda [s]	Iterativna metoda [s]	Omjer
3	0.000688	0.002361	3:1
10	0.033485	0.09173	1:3
20	1.322528	1.52307	1:1
50	512.85	187.88	3:1
60	1526.71	462.62	3:1
70	4631.99	842.02	6:1
100	38147.97	4398.34	9:1

6. Zaključak

Današnji visoki zahtjevi u proračunu izrazito kompleksnih konstrukcija nalažu primjenu optimalne metode proračuna uzimajući u obzir kriterij točnosti dobivenih rješenja i potrebnog vremena proračuna. Optimalan odabir metode rješavanja sustava linearnih jednadžbi ovisi o nekoliko faktora. Najvažniji su tražena točnost rješenja te složenost i brzina

algoritma kojim dolazimo do rješenja. Direktnim metodama dobivamo točna rješenja, no često se zadovoljavamo i približnim rješenjima do kojih dolazimo jednostavnije i brže. Upravo nedostatak direktnih metoda rezultira neprihvatljivo lošim performansama u pogledu vremena i prostora potrebnog za izračun složenijih sustava. U posljednjem primjeru vidimo da je vrijeme potrebno za dobivanje rješenja iterativnom metodom višestruko manje, a tražena točnost je zadovoljavajuća. Stoga, u velikom broju slučajeva kod određenih vrsta matrica iterativna metoda rješavanja sustava linearnih jednadžbi predstavlja bolji odabir u odnosu na direktnu metodu, naročito kod tzv. rijetkih (*eng. sparse*) matrica.

Literatura

- [1] Ivanšić, I., *Numerička matematika*, Element, Zagreb, 1998.
- [2] Rogina, M., Singer, S., Singer, S. *Numerička analiza*, Sveučilište u Zagrebu, PMF-Matematički odjel, Zagreb, 2003.
- [3] Scitovski, R., *Numerička matematika*, Odjel za matematiku Sveučilišta u Osijeku i Elektrotehnički fakultet, Osijek, 1999.
- [4] Auzinger, W., Melenk, J. M., *Iterative Solution of Large Linear Systems*, Beč, 2015.

VALNA JEDNADŽBA U POLARNIM KOORDINATAMA

WAVE EQUATION IN POLAR COORDINATES

Josip Peranić*, Tin Zrinski**, Nermina Mujaković**

Sažetak

Parcijalne diferencijalne jednačbe (PDJ) opisuju razne fizikalne procese u prirodi, pri čemu funkcije koje se promatraju mogu zavisiti o dvije ili nekoliko nezavisnih varijabli. Jedna od varijabli može biti vrijeme t , odnosno, jedna ili više prostornih varijabli. Uobičajeno se pri rješavanju problema s PDJ koristi onaj koordinatni sustav u kojem će PDJ biti jednostavnija a time i lakše rješiva. Također, treba voditi računa da se pripadajući inicijalno-rubni uvjeti pojednostave. U prvom dijelu rada izvodimo matematički model koji opisuje oscilacije tanke elastične membrane u vremenu. Time dobivamo PDJ drugog reda u dvije dimenzije s inicijalnim i rubnim uvjetima. Rješenje problema je funkcija otklona $u = u(x, y, t)$. Problem prevodimo u polarne koordinate (r, θ) te u sljedećem dijelu rada konstruiramo rješenje metodom separacije varijabli za zadane početne i rubne uvjete, te za radijalno simetrični slučaj vibracija membrane. U praktičnom dijelu zadatka korištenjem programa Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 9.0, Champaign, IL (2012), konstruirana su rješenja za dva slučaja radijalno simetričnog vibriranja kružne membrane, s homogenim rubnim i različitim početnim uvjetima.

Ključne riječi: valna jednačba, inicijalno-rubni uvjeti, metoda separacije, Fourierova metoda, Besselove funkcije

Abstract

Partial differential equations (PDEs) describe diverse physical processes that occur in nature, where functions that are observed may depend on two or more independent variables. Time t could be one of the variables, while one or few spatial variables could

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: josip.peranic@uniri.hr

**Odjel za matematiku Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 2, 51000 Rijeka
E-mail: tizrinski@uniri.hr, nmujakovic@math.uniri.hr

represent the reset of them. When dealing with problems that involve PDEs, it is convenient to use coordinate system that results in a simpler form of the equation, therefore, a simpler problem to solve. Corresponding initial and boundary conditions should be simplified as well. In the first part of the paper, a mathematical model that describes oscillations of a thin elastic membrane in time is derived. Thus, a second order PDE in two dimensions with initial and boundary conditions is obtained. Solution to the problem is a function of deflection $u = u(x, y, t)$. After the problem is translated into polar coordinates (r, θ) , the solution is determined by using the separation of variables method for given initial and boundary conditions and for the radially symmetrical case of vibrations. At the end of the paper Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 9.0, Champaign, IL (2012) software is used in order to generate solutions for two radially symmetric problems of circular membrane vibrations. Homogenous boundary conditions and different initial conditions were used in both cases.

Key words: wave equation, initial and boundary conditions, separation of variables method, Fourier method, Bessel functions

1. Uvod

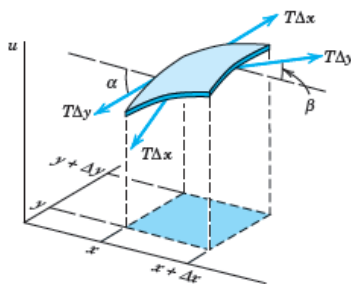
U ovom radu promatraju se oscilacije fiksirane membrane u vremenu. Uvođenjem određenih pretpostavki te promatranjem sila koje djeluju na infinitezimalan segment deformirane membrane izveden je matematički model valne jednadžbe u dvije dimenzije. S obzirom da je pretpostavljen kružni oblik membrane, dobivena jednadžba prevedena je u polarne koordinate. U slijedećem koraku, primijenjenom metode separacije varijabli, PDJ svedena je na dvije ODJ, uz poseban osvrt na rješenja Besselove jednadžbe. Određivanjem koeficijenata Fourier-Besselova reda i zadovoljavanjem definiranih početnih i rubnih uvjeta dolazi se do konačnog rješenja valne jednadžbe. U zadnjem dijelu rada prikazana su rješenja za dva praktična primjera konstruirana upotrebom programa *Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 9.0, Champaign, IL (2012)*.

2. Matematički model valne jednadžbe u dvije dimenzije

Titranje tanke elastične membrane, zategnute i zatim fiksirane na svojim rubovima, predstavlja dvodimenzionalni problem opisan valnom jednadžbom u dvije dimenzije. Problem se sastoji u određivanju funkcije otklona membrane $u(x, y, t)$ u bilo kojoj točki (x, y) i bilo kojem vremenskom trenutku t . Traženi otklon bit će rješenje matematičkog modela koji se sastoji od PDJ drugog reda sa zadanim početnim i rubnim uvjetima. Prije samog izvoda modela, uvedimo određene pretpostavke na cjelokupni problem [1]:

1. Omjer mase membrane i jedinice površine je konstantan (takvu membranu nazivamo *homogenom*). Membrana je savršeno elastična i ne pruža otpor savijanju.
2. Membrana je napeta i učvršćena duž čitavog ruba u xy –ravnini. *Napetost membrane* T po jediničnoj duljini ista je u svim točkama i svim smjerovima membrane te se ne mijenja pri titranju membrane.
3. *Otklon membrane* $u(x, y, t)$ je zanemariv u odnosu na veličinu membrane. Svi kutovi nagiba membrane također su zanemarivi.

Izvedimo PDJ za opisani model (dvodimenzionalnu valnu jednačbu) promatrajući sile koje djeluju na mali izdvojeni segment membrane, kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Segment membrane pri vibriranju (izvor: [1])

S obzirom na to da su otkloni membrane i kutovi nagiba maleni, duljine bridova izdvojenog segmenta membrane možemo aproksimirati veličinama Δx i Δy . Uzevši u obzir silu napetosti T membrane po jediničnoj duljini, slijedi da sile koje djeluju na rubovima promatranog dijela membrane iznose približno $T\Delta x$ i $T\Delta y$. Ove sile tangencijalne su na plohu titrajuće membrane u svakom vremenskom trenutku.

S obzirom da su pretpostavljeni maleni kutovi nagiba membrane, njihovi kosinusi približno su jednaki vrijednosti 1 pa slijedi da se gibanje membrane može promatrati kao transverzalno. Vertikalne komponente s lijeve i desne strane su, redom

$$-T\Delta y \sin\alpha \quad \text{i} \quad T\Delta y \sin\beta. \quad (1)$$

Ovdje su α i β vrijednosti kutova otklona membrane u središtu rubova, koji očito blago variraju duž rubova Δx i Δy promatranog segmenta membrane. Kako su kutovi maleni, sinuse je moguće aproksimirati tangensima kutova koji predstavljaju nagib membrane u točkama x i $x + \Delta x$, čime je rezultanta dviju vertikalnih komponenti sila

$$T\Delta y (\sin\beta - \sin\alpha) \approx T\Delta y \left[\frac{\partial u}{\partial x}(x + \Delta x, y_1) - \frac{\partial u}{\partial x}(x, y_2) \right] \quad (2)$$

Pritom su y_1 i y_2 vrijednosti između y i $y + \Delta y$. Rezultanta vertikalnih komponenti koje djeluju na druga dva kraja segmenta membrane je

$$T\Delta x \left[\frac{\partial u}{\partial y}(x_1, y + \Delta y) - \frac{\partial u}{\partial y}(x_2, y) \right], \quad (3)$$

gdje su x_1 i x_2 vrijednosti između x i $x + \Delta x$. Primjenom drugog Newtonova zakona, za sumu sila (2) i (3) dobivamo

$$\rho\Delta x\Delta y \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = T\Delta y \left[\frac{\partial u}{\partial x}(x + \Delta x, y_1) - \frac{\partial u}{\partial x}(x, y_2) \right] + T\Delta x \left[\frac{\partial u}{\partial y}(x_1, y + \Delta y) - \frac{\partial u}{\partial y}(x_2, y) \right], \quad (4)$$

pri čemu se derivacija na lijevoj strani računa u nekoj točki odabranog segmenta membrane. Dijeljenjem s $\rho\Delta x\Delta y$ (4) postaje

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \left[\frac{\frac{\partial u}{\partial x}(x + \Delta x, y_1) - \frac{\partial u}{\partial x}(x, y_2)}{\Delta x} + \frac{\frac{\partial u}{\partial y}(x_1, y + \Delta y) - \frac{\partial u}{\partial y}(x_2, y)}{\Delta y} \right], \quad (5)$$

te ako promatramo beskonačno malen segment membrane, odnosno ako $\Delta x \rightarrow 0$ i $\Delta y \rightarrow 0$, dobije se PDJ uspostavljenog modela koja glasi

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad c^2 = \frac{T}{\rho} \quad (6)$$

Ova homogena PDJ drugog reda naziva se dvodimenzionalna valna jednadžba. Izraz (6), uz korištenje Laplacijana poprima oblik

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u. \quad (7)$$

U nastavku rada izvedena valna jednadžba iz Kartezijeva koordinatnog sustavu $P(x, y)$ prevodi se u polarne koordinate $P(r, \theta)$.

2.1. Laplaceova jednadžba u polarnim koordinatama. Kružna membrana

Kako se ovdje promatraju vibracije kružne membrane, koristit će se ravninski polarni koordinatni sustav s ishodištem postavljenim u središtu kružnice, odnosno membrane. Ovime je položaj svake točke P određen polarnim koordinatama (r, θ) . Zamjenom $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$, (6) postaje PDJ oblika

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \right), \quad c^2 = \frac{T}{\rho}. \quad (8)$$

3. Primjena metode separacije varijabli u rješavanju valne jednačbe (8)

U nastavku se opisuje postupak određivanja rješenja valne jednačbe (8) na kružnoj domeni uz homogeni rubni uvjet (membrana učvršćena duž ruba). Radijus domene neka je R . Početni oblik (izgled) membrane za $t = 0$ opisivat će se funkcijom $f(r, \theta)$, dok funkcija $g(r, \theta)$ definira početnu brzinu membrane za $t = 0$. U ovom radu promatramo samo radijalno simetrična rješenja $u = u(r, t)$. Rješenja ne ovise o θ , pa (8) postaje

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (9)$$

na domeni $\Omega = \{(r, \theta, t): 0 \leq r < R, \theta \in [0, 2\pi), t > 0\}$ uz rubni uvjet

$$u(R, t) = 0, \quad t > 0 \quad (10)$$

Definiramo početni uvjeti oblika i brzine membrane:

$$u(r, 0) = f(r), \quad \frac{\partial u}{\partial t}(r, 0) = g(r), \quad 0 < r < R \quad (11)$$

Uvjet (10) opisuje rubni uvjet i podrazumijeva učvršćenost membrane duž ruba $r = R$, a izrazi u (11) predstavljaju početne uvjete za otklon $f(r)$ u trenutku $t = 0$ i njegovu brzinu $g(r)$. Ideja rješavanja problema metodom separacije varijabli jest razdvajanjem varijabli reducirati problem na dvije obične diferencijalne jednačbe (ODJ-e) po varijablama r i t . Pretpostavimo da je $u(r, t) = W(r)G(t)$. Uvrštavanjem u (9) dobivamo

$$\frac{\ddot{G}}{c^2 G} = \frac{1}{W} \left(W'' + \frac{1}{r} W' \right), \quad (12)$$

gdje se lijevo pojavljuje derivacija funkcije G po t , a desno derivacija W po r . Lijevi dio izraza ne zavisi od r , odnosno desni ne zavisi od t pa da bi jednakost bila moguća zaključujemo da su obje strane izraza u (12) konstantne i označavamo ih K . Lijevi dio jednačbe, koji sadrži vremensku komponentu, ima rješenja koja eksponencijalno rastu ili opadaju za $K > 0$, koja su linearna ili konstante za $K = 0$, odnosno periodična rješenja za $K < 0$. Obzirom da očekujemo rješenje problema u obliku oscilacija, uzimamo da je konstanta $K = -k^2$, $k \neq 0$. Na taj način moguće je dobiti netrivialna rješenja koja zadovoljavaju zadani rubni uvjet. Konačno imamo dvije linearne ODJ-e [2]:

$$\ddot{G} + \lambda^2 G = 0, \quad \lambda = ck \quad (13)$$

$$W'' + \frac{1}{r} W' + k^2 W = 0. \quad (14)$$

Opće rješenje homogene linearne ODJ-e s konstantnim koeficijentima (13) predstavlja gibanje u obliku harmonijskih oscilacija, a poznatog je oblika

$$G(t) = A \cos \lambda t + B \sin \lambda t. \quad (15)$$

U nastavku će se (14) reducirati na Besselovu jednadžbu. Uvedimo, zbog jednostavnosti, supstituciju $x = kr$ te iz (14) dobivamo

$$\frac{d^2W}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dW}{dx} + W = 0. \quad (16)$$

Jednadžba (16) predstavlja Besselovu jednadžbu s parametrom nula. Budući da je Besselova jednadžba diferencijalna jednadžba drugog reda, moraju postojati dva linearno nezavisna rješenja iste. Pronalaženje rješenja Besselove jednadžbe upotrebom tzv. Frobeniusove metode navodimo u narednom poglavlju. Prvo rješenje Besselove jednadžbe naziva se Besselovim funkcijama prve vrste, označavaju se sa $J_\nu(x)$, gdje je ν parametar i rješenja su Besselove diferencijalne jednadžbe s konačnim iznosom u ishodištu ($x = 0$), za bilo koji ne negativan ν . Drugo linearno nezavisno rješenje Besselove jednadžbe naziva se Besselovim funkcijama druge vrste, označavaju se sa $Y_\nu(x)$. One poprimaju beskonačne vrijednosti kako $x \rightarrow 0$.

4. Frobeniusova metoda. Besselova jednadžba i Besselove funkcije

Rješenja ODJ-i s varijabilnim koeficijentima vrlo često su ne elementarne funkcije, poznate pod tehničkim nazivom „više“ ili „specijalne“ funkcije. Dvije standardne metode koje se koriste za rješavanje ovakvih ODJ-i su redovi potencija (*eng. power series method*) i Frobeniusova metoda kojom se generalizira prva [1]. Frobeniusova metoda koristi se za rješavanje Besselove diferencijalne jednadžbe.

4.1. Proširena metoda redova potencija – Frobeniusova metoda

TEOREM 1. (Frobeniusova metoda) Neka su $b(x)$ i $c(x)$ bilo koje funkcije takve da su analitičke u $x = 0$, tj. mogu se prikazati u obliku reda potencija po x , koji konvergira na nekom intervalu $< -R, R >$. Tada ODJ

$$y'' + \frac{b(x)}{x} y' + \frac{c(x)}{x^2} y = 0 \quad (17)$$

sadrži barem jedno rješenje oblika

$$y(x) = x^r \sum_{m=0}^{\infty} a_m x^m = x^r (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots), \quad a_0 \neq 0 \quad (18)$$

pri čemu eksponent r može biti bilo koji (realni ili kompleksni) broj i odabire se tako da je $a_0 \neq 0$. Ovime se dobiva red potencija pomnožen s varijablom čiji eksponent ne mora biti pozitivni cijeli broj.

4.2. Besselova jednačba i Besselove funkcije $J_n(x)$, $n \in \mathbf{N}$

Besselova jednačba oblika je (17)

$$y'' + \frac{1}{x}y' + \left(\frac{x^2 - v^2}{x^2}\right)y = 0 \quad (19)$$

sa $b(x) = 1$ i $c(x) = x^2 - v^2$, koje su analitičke u $x = 0$ te je Teorem 1 primjenjiv. Parametar v je realan broj, pozitivan ili jednak nuli. Za potrebe ovog rada uzimamo $v = n$, $n \in \mathbf{N}_0$. Prema Frobeniusovoj metodi, Besselova jednačba ima rješenje oblika

$$y(x) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m x^{m+r} \quad (20)$$

Uvrstimo li (20) u (19) dobivamo sustav jednačbi s nepoznicama a_m čija su rješenja nule za neparne indekse, dok za parne indekse dobivamo

$$a_{2m} = \frac{(-1)^m}{2^{2m+n} m!(n+m)!}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (21)$$

Detaljan postupak za dobivanje (21) nalazi se u [1]. Uvrštavajući (21) u (20), dobivamo rješenje od (19) u formi

$$J_n(x) = x^n \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m x^{2m}}{2^{2m+n} m!(n+m)!}, \quad (n \geq 0) \quad (22)$$

$J_n(x)$ naziva se **Besselova funkcija prve vrste reda n** . Istaknimo da red (22) konvergira za sve x . Napomenimo da je za opće rješenje Besselove jednačbe (19), uz J_v potrebno je još jedno linearno nezavisno rješenje no ono nam za rješavanje naših primjera nije potrebno te ga ovdje ne izvodimo. Spomenimo samo da se to rješenje naziva Besselova funkcija druge vrste i da je neomeđeno.

5. Rješenje valne jednačbe (9). Rubni uvjeti

Pri definiranju fizikalnog modela pretpostavljeni su vrlo maleni progibi membrane. Konačan progib u središtu membrane može se također smatrati rubnim uvjetom i implicira korištenje samo Besselovih funkcija prve vrste nultog reda ($n = 0$). Time se pretpostavlja da je rješenje W od (16) oblika

$$W(r) = J_0(x) = J_0(kr), \quad x = kr. \quad (23)$$

Rub membrane (za $r = R$) je fiksiran te nema pomaka, odnosno, iz rubnog uvjeta (10) slijedi

$$W(R) = J_0(kR) = 0. \quad (24)$$

Drugi slučaj implicirao bi da je $u \equiv 0$, što nas ne interesira. Zadovoljavanje uvjeta (24) moguće je s obzirom da J_0 ima beskonačno mnogo pozitivnih nultočaka. Iz (24) slijedi

$$kR = \alpha_m, \quad k = k_m = \frac{\alpha_m}{R}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (25)$$

Dakle, funkcije

$$W_m(r) = J_0(k_m r) = J_0\left(\frac{\alpha_m}{R} r\right), \quad m = 1, 2, \dots \quad (26)$$

su rješenja od (14) s homogenim rubnim uvjetom na rubu $r = R$. Zbog (25), odgovarajuće opće rješenje od (13) je sada

$$G_m(t) = A_m \cos \lambda_m t + B_m \sin \lambda_m t, \quad \lambda_m = ck_m = c \frac{\alpha_m}{R}. \quad (27)$$

Time su funkcije oblika

$$u_m(r, t) = (A_m \cos \lambda_m t + B_m \sin \lambda_m t) J_0(k_m r), \quad m = 1, 2, \dots \quad (28)$$

rješenja valne jednadžbe (9) koja zadovoljavaju rubni uvjet (10). Ove funkcije nazivaju se svojstvene ili karakteristične funkcije, dok se pripadajuće vrijednosti λ_m nazivaju svojstvene ili karakteristične vrijednosti problema. Kako bi dobili rješenje koje zadovoljava i rubni uvjet i početne uvjete (10) i (11), promotrimo sljedeći red koji slijedi iz (28)

$$\begin{aligned} u(r, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} W_m(r) G_m(t), \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} (A_m \cos \lambda_m t + B_m \sin \lambda_m t) J_0\left(\frac{\alpha_m}{R} r\right). \end{aligned} \quad (29)$$

Prema početnom uvjetu (11), za $t = 0$ iz (29) dobivamo

$$u(r, 0) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m J_0\left(\frac{\alpha_m}{R} r\right) = f(r). \quad (30)$$

Kako bi red (29) zadovoljavao uvjet (30), konstante A_m moraju biti koeficijenti Fourier-Besselova reda (30) te dobivamo [3]

$$A_m = \frac{2}{R^2 J_1^2(\alpha_m)} \int_0^R r f(r) J_0\left(\frac{\alpha_m}{R} r\right) dr, \quad m = 1, 2, \dots \quad (31)$$

Diferencijabilnost funkcije $f(r)$ na intervalu $0 \leq r \leq R$ dovoljna je za postojanje razvoja (30). Koeficijenti B_m mogu se odrediti na sličan način ako se traži da red (29) zadovoljava drugi uvjet u (11) [1]. Tada za $t = 0$, iz (29) slijedi [3]

$$\frac{\partial}{\partial t} u(r, 0) = \sum_{m=1}^{\infty} \lambda_m B_m J_0\left(\frac{\alpha_m}{R} r\right) = g(r), \quad (32)$$

$$B_m = \frac{2}{(c\alpha_m R) J_1^2(\alpha_m)} \int_0^R r g(r) J_0\left(\frac{\alpha_m}{R} r\right) dr, \quad m = 1, 2, \dots \quad (33)$$

6. Primjeri izrađeni u programskom paketu Mathematica

Korištenjem programa *Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 9.0, Champaign, IL (2012)*, konstruirana su rješenja problema (9)-(11). Razmatrani su različiti slučajevi početnih uvjeta kako bi se promatrao utjecaj istih na vibracije membrane. Algoritam se sastoji iz nekoliko osnovnih koraka. U prvom dijelu definiraju se parametri modela: početni uvjeti oblika i brzine membrane za $t = 0$ preko funkcija $f(r)$ i $g(r)$. Geometrijski uvjeti definiraju se preko radijusa membrane R , odnosno varijable b ukoliko je potrebno dodatno izdvojiti pojedini dio membrane pri definiranju početnih uvjeta. Također definiraju se napetost membrane c i broj sumanada n . Vrlo je zanimljivo promatrati na koji način se Besselove funkcije prilagođavaju definiranim početnim uvjetima s povećanjem broja n . U slijedećem koraku određuje se prvih n nultočaka Besselove funkcije prve vrste nultoga reda $J_0(r) = 0$, te vrijednosti Besselovih funkcija prve vrste prvog reda u izračunatim nultočakama $J_1(\alpha_m)$. Dobivenim vrijednostima u slijedećem koraku računaju se koeficijenti Fourier-Besselova reda A_m i B_m kako bi se dobile aproksimacije početnih uvjeta $f(r)$ i $g(r)$. Nakon toga određuje se rješenje kao funkcija vremena uvrštavanjem vrijednosti u izraz (29).

6.1. Membrana pobuđena vertikalnim udarcem u središte

U ovom primjeru membrana se počinje gibati iz ravnotežnog položaja $f(r) = 0$ uslijed vertikalnog udarca u središte membrane brzinom $g(r) = -50$. Radijus membrane iznosi $R = 1$, a uvjet $g(r)$, odnosno, radijus dijela membrane zahvaćen udarcem iznosi $b = 0.1$. Pretpostavljena je izotropna napetost membrane $c = 100$, uz aproksimaciju reda s $n = 30$.

Rješenje: Najprije određujemo Fourier-Besselove koeficijente, A_m i B_m . Iz $f(r) = 0$ slijedi $A_m = 0$. Koeficijente B_m koji odgovaraju $g(r)$ na intervalu $[0, b)$ dobivamo naredbom

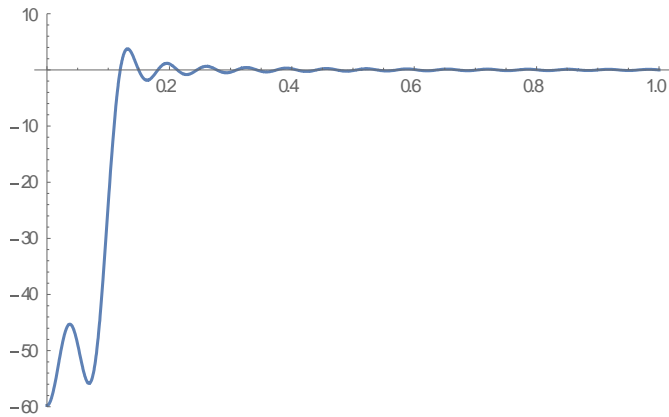
```
Bm = Table[(2/(c*BesselZero[0, m]*R*(BesselJ[1, BesselZero[0, m]]^2))*
NIntegrate[r (g[r])*BesselJ[0, BesselZero[0, m]*r/R], {r, 0, b}], {m, 1, n}].
```

Za dobivanje prvih n nultočaka Besselove funkcije, α_m koristimo naredbu

```
 $\alpha = \text{Table}[N[\text{BesselZero}[0, m]], \{m, 1, n\}]$ 
```

Aproksimacija početne brzine $g(r)$ prikazana je na Slici 2. Prilikom konstrukcije slike koristili smo se naredbom

```
Plot[Bm.Table[(c *  $\alpha[[m]]/R$ ) * BesselJ[0,  $\alpha[[m]]$ ] *
r/R], {m, 1, n}], {r, 0, R}, PlotRange  $\rightarrow$  {-55, 10}].
```



Slika 2. Aproximacija početne brzine $g(x)$

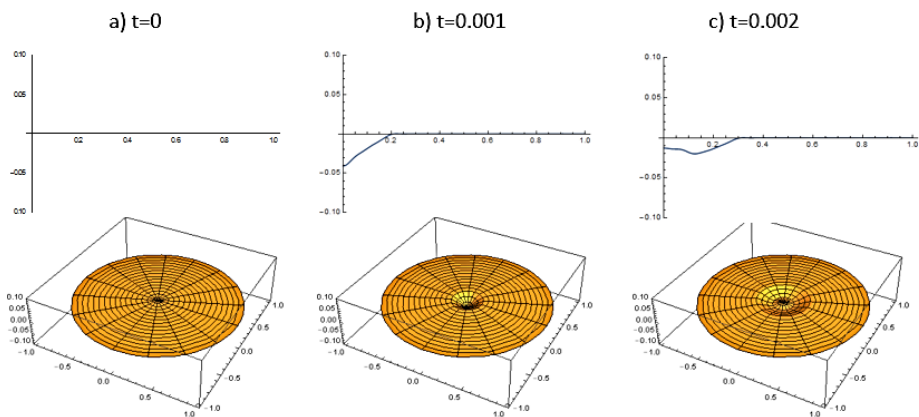
Vrijednosti Besselove funkcije prve vrste prvog reda u izračunatim nultočkama α_m dobivamo naredbom

```
Table[BesselJ[1,  $\alpha$ [[m]]], {m, 1, n}].
```

Prikaz rješenja u vremenu t dan je na Slici 3. Za dobivanje prikaza smo se koristili sljedećim naredbama:

```
Manipulate[Plot[Bm. Table[Sin[c *  $\alpha$ [[m]] * t/R] * BesselJ[0,  $\alpha$ [[m]] * r/R], {m, 1, n}], {r, 0, R}, PlotRange → {-1., 1}], {t, 0, 0.026}],
```

```
Manipulate[RevolutionPlot3D[Bm. Table[Sin[c *  $\alpha$ [[m]] * t/R] * BesselJ[0,  $\alpha$ [[m]] * r/R], {m, 1, n}], {r, 0, R}, {phi, 0, 2 * Pi}, PlotRange → {All, All, {-1., 1}}], {t, 0, 0.026}].
```



Slika 3. Rješenje vibracija membrane za različite trenutke vremena t

6.2. Membrana s zadanim početnim oblikom

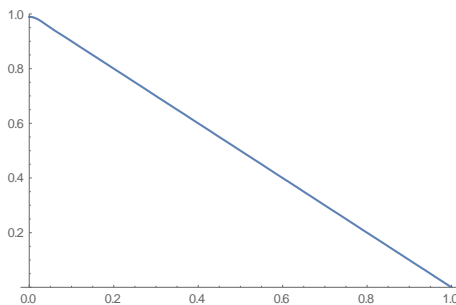
U ovom primjeru membrana radijusa $R = 1$ puštena je da oscilira u vremenu iz početnog položaja $f(r) = 1 - r/R$ i bez početne brzine ($g(r) = 0$). Vrijednosti c i n usvojene su iz prethodnog primjera.

Rješenje: Odredimo Fourier-Besselove koeficijente A_m i B_m :

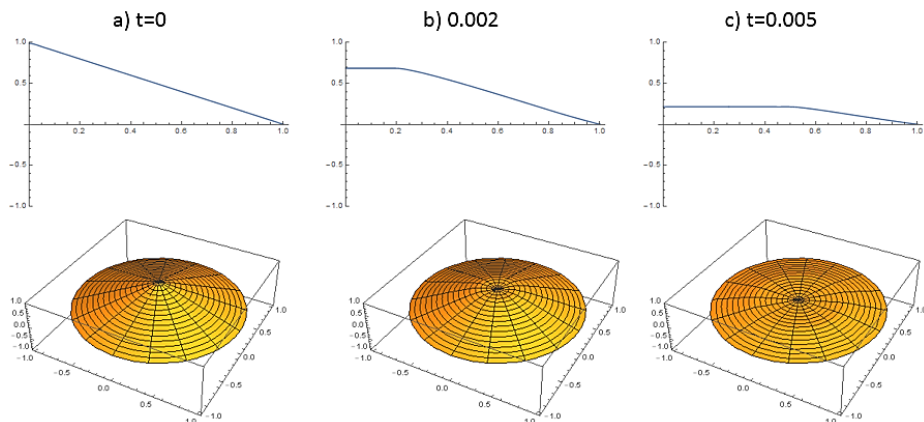
Iz $g(r) = 0$ slijedi $B_m = 0$. Koeficijente koji odgovaraju $f(r)$ na intervalu $[0, r]$ dobivamo naredbom

```
Am = Table[(2/(R * (BesselJ[1, BesselJZero[0, m]]))^2) * NIntegrate[r *
(f[r] * BesselJ[0, BesselJZero[0, m] * r/R], {r, 0, R}), {m, 1, n}].
```

Prvih n nultočaka Besselove funkcije α_m , aproksimaciju početnog oblika membrane $f(r)$ te vrijednosti Besselove funkcije prve vrste prvog reda u izračunatim nultočkama α_m dobivamo na isti način kao i u prethodnom primjeru. Aproksimacija početnog oblika membrane $f(r)$ prikazana je na Slici 4 dok je Slikom 5 dan prikaz rješenja u vremenu t .



Slika 4. Aproksimacija početnog oblika membrane $f(r)$



Slika 5. Rješenje vibracija membrane za različite trenutke vremena t

7. Zaključak

Primjena parcijalnih diferencijalnih jednadžbi od iznimnog je značaja za većinu tehničkih znanosti. PDJ omogućavaju matematičko opisivanje prirodnih pojava, čime predstavljaju osnovu za kvantitativno proučavanje istih. Njima je moguće opisati fenomene poput širenja zvuka, tečenja fluida, prijenosa topline i dr., pri čemu zavisnost od više nezavisnih varijabli osigurava široko područje primjene PDJ.

Kružne membrane važni su dijelovi bubnjeva, pumpi, mikrofona, telefona i drugih uređaja te su vrlo bitne u inženjerskoj primjeni [1]. Kad god je kružna membrana, pričvršćena duž ruba, izrađena od tankog elastičnog materijala koji ne pruža otpor na savijanje (ovo se ne odnosi na tanke metalne membrane), tada ju je moguće modelirati izvedenom 2D valnom jednadžbom u polarnim koordinatama (8).

U radu smo se ograničili na promatranje simetričnog slučaja vibriranja učvršćene membrane u vremenu. Također, u model su uvedena određena racionalna pojednostavljenja (homogenost, konstantna napetost i maleni progibi membrane) kako bi rezultirajući matematički model bio jednostavniji za rješavanje. Rješenja u obliku oscilacija membrane u vremenu konstruirana su programom *Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 9.0, Champaign, IL (2012)*, za dva različita slučaja inicijalne pobude membrane. Pritom je vrlo zanimljivo promatrati način na koji se aproksimiraju zadani početni uvjeti variranjem definiranih parametara te rezultate konstruirane za različite početne i rubne uvjete.

Ukoliko bi se modelirale oscilacije membrane bez pretpostavljanja simetričnih oscilacija, primjenom metode separacije varijabli na (8) dobili bismo dodatnu varijablu (kut θ) čime bi postupak određivanja rješenja bio dodatno složeniji, a Besselova jednadžba pojavila bi se u parametarskom obliku višeg reda (m) [3].

Literatura

- [1] Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [2] Boyce, W. E., DiPrima, R. C., *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*, John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [3] Nakhle, H. A., *Partial Differential Equations with Fourier series and Boundary Value Problems*, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
- [4] http://personal.rhul.ac.uk/UHAP/027/PH2130/PH2130_files/orthofu2.pdf
- [5] <http://www2.phy.ilstu.edu/~rfm/320S09/BesselDrum.html>

MOGUĆNOSTI UPORABE VAPNENOG MULJA U PROIZVODNJI SAMOSLIJEGAJUĆEG BETONA

POSSIBILITIES OF LIME SLUDGE USE IN SELF- COMPACTING CONCRETE PRODUCTION

Silvija Mrakovčić*, Mirna Klobučar*, Nika Krajnović*

Sažetak

Pri proizvodnji acetilena, reakcijom kalcijeva karbida i vode, nastaje, kao nusprodukt, vapneni mulj, odnosno gašeno vapno ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), koje je jedan od glavnih produkata hidratacije cementa, odnosno jedan od glavnih sastojaka cementnog kamena. Stoga se pretpostavlja da bi se pri proizvodnji betona određena količina vode mogla zamijeniti vapnenim muljem. U radu je analizirana mogućnost uporabe vapnenog mulja u proizvodnji samoslijegajućeg betona. Napravljeni su uzorci referentnog betona te uzorci betona kojemu je određen postotak vode zamijenjen vapnenim muljem. Na svježim betonskim mješavinama ispitana je konzistencija betona pomoću V – lijevka. Na uzorcima očvrstnulog samoslijegajućeg betona njegovanog 28 dana u vodi ispitana je tlačna čvrstoća, prodor vode pod tlakom i plinopropusnost. Analiziran je utjecaj zamjene dijela vode za spravljanje betona vapnenim muljem na svojstva svježeg i očvrstnulog samoslijegajućeg betona.

Ključne riječi: samoslijegajući beton, vapneni mulj, konzistencija, tlačna čvrstoća, vodopropusnost, plinopropusnost

Abstract

During the process of acetylene production, the by-product of the reaction of calcium carbide on water is lime slug or portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), which is one of the main products of cement hydration, that is, one of the main ingredients of hardened cement paste. This is the reason why it is presumed that in concrete production lime slug could be substituted for a certain amount of water. The paper analyses the possibility of the use of lime slug in the production of self-compacting concrete. Referential concrete samples as well as concrete samples in which lime slug has been substituted for a certain percentage of water have been made. The consistency of concrete has been checked on fresh concrete mixtures by means of V-funnel. The compressive strength,

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, R. Matejčić 3, Rijeka
E-mail: {silvija.mrakovcic, mirna.klobucar, nika.krajnovic}@uniri.hr

depth of water penetration and gas permeability have been examined on samples of hardened self-compacting concrete cured for 28 days in the water. An analysis has been made of the effect of the substitution of lime slug for a certain part of water for mixing concrete on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete.

Key words: *self-compacting concrete, lime sludge, consistency, compressive strength, water permeability, gas permeability*

1. Uvod

Samoslijegajući je beton (eng. self-compacting concrete, SCC) iznimno fluidna vrsta betona koja ima sposobnost tečenja pod djelovanjem vlastite težine bez pojave segregacije. U potpunosti ispunjava oplatu i postiže potpunu zbijenost, zaobilazeći čak i gusto raspoređenu armaturu. Razvijen je u Japanu krajem 80-ih godina prošlog stoljeća zbog nedostatka kvalificirane radne snage u građevinskoj industriji te kako bi se omogućilo kvalitetno izvođenje i dugotrajnost betonskih građevina. Iako je izvorno zamišljen kao alat za poboljšanje dugoročne trajnosti konstrukcija ojačanih armaturom, zbog odličnih svojstava i jednostavne upotrebe danas ima puno širu primjenu. U Europi je prvi put upotrijebljen sredinom 1990.-ih godina pri izgradnji transportne mreže u Švedskoj [1]. Specifičnost samoslijegajućeg betona je u tome što zadržava karakteristike jednake običnom betonu, no bez potrebe vibriranja prilikom ugradnje [2]. Nekoliko je prednosti samoslijegajućeg betona u odnosu na običan beton: smanjeni broj potrebne radne snage jer nije potrebno vibrirati beton, smanjeni intenzitet buke te uslijed toga olakšani uvjeti rada, skraćeno vrijeme ugradnje, olakšano tečenje betona oko guste armature, kvalitetniji izgled površine betona, povećana trajnost uslijed homogenije poroznosti.

Svojstva ove vrste betona uvelike ovise o karakteristikama sastavnih materijala i njihovim udjelima u smjesi te je pravilno projektiranje smjese od iznimne važnosti. Najveće zrno agregata ne bi trebalo biti veće od 16 mm, a količina čestica manjih od 0,125 mm ubraja se u ukupnu količinu praškastih komponenti [3]. U proizvodnji mješavina samoslijegajućih betona neizostavna je uporaba superplastifikatora, čime se postiže visoka fluidnost. Takvi se betoni često proizvode s malim vodocementnim omjerom, što im daje visoku ranu čvrstoću, omogućuje ranije skidanje oplata i bržu uporabu konstruktivnih elemenata i samih konstrukcija.

Pri proizvodnji acetilena kao nusprodukt ostaje vapneni mulj. Pretpostavlja se da bi se u mješavinama samoslijegajućeg betona određena količina vode mogla zamijeniti vapnenim muljem. U radu [4], iz vapnenog mulja iz proizvodnje acetilena vakumskom je filtracijom odvojena kruta od tekuće komponente te je analizom utvrđeno da se tekuća komponenta može dalje koristiti kao reciklirana voda. U radu [5], 10 i 20% cementa za

mješavinu betona zamijenjeno je krutom komponenta mulja dobivenog iz proizvodnje mramora, a rezultati ispitivanja su pokazali da takvi uzorci imaju manju propusnost od referentnog betona. Za sada nisu provedena istraživanja u kojima je dio vode za mješavinu betona zamijenjen vapnenim muljem iz proizvodnje acetilena.

U radu je analizirana mogućnost uporabe vapnenog mulja u proizvodnji samoslijegajućeg betona. Napravljeni su uzorci referentnog betona te uzorci betona kojemu je određen postotak vode zamijenjen vapnenim muljem. Na svježim betonskim mješavinama ispitana je konzistencija betona pomoću V – lijevka. Na uzorcima očvrstulog samoslijegajućeg betona njegovanog 28 dana u vodi ispitana je tlačna čvrstoća, prodor vode pod tlakom i plinopropusnost. Analiziran je utjecaj zamjene dijela vode za spravljanje betona vapnenim muljem na svojstva svježeg i očvrstulog samoslijegajućeg betona.

2. Uporaba vapnenog mulja u mješavinama betona

Pri proizvodnji acetilena, reakcijom kalcijeva karbida i vode nastaje, kao nusprodukt, vapneni mulj odnosno gašeno vapno (Ca(OH)_2) (1)



Ca(OH)_2 jedan je od glavnih produkata hidratacije cementa odnosno jedan od glavnih sastojaka cementnog kamena. Stoga se pretpostavlja da bi se, pri proizvodnji betona, pa tako i samoslijegajućeg betona, određena količina vode mogla zamijeniti vapnenim muljem.

Kvaliteta vode s kojom se priprema beton može utjecati na vrijeme vezivanja, razvoj čvrstoće betona te stupanj zaštite armature od korozije. Stoga se, kad se ocjenjuje pogodnost vode za pripremu betona, u obzir moraju uzeti sastav vode i primjena betona koji će biti pripremljen s takvom vodom. Voda za pripremu betona koja nije isključivo iz vodovoda (pitka voda) podliježe zahtjevima norme *HRN EN 1008: 2002 Voda za pripremu betona – Specifikacije za uzorkovanje, ispitivanje i potvrđivanje prikladnosti vode, uključujući vodu za pranje iz instalacija za otpadnu vodu u industriji betona kao vode za pripremu betona* (u daljnjem tekstu – norma). Budući da u spomenutoj normi voda s dodatkom vapnenog mulja nije definirana, uzet će se u obzir zahtjevi i ograničenja za vodu za pranje iz instalacija za otpadnu vodu u industriji betona jer uključuju i kombiniranu vodu (mješavina vode za pranje iz instalacija za otpadnu vodu u industriji betona i vode nekog drugog podrijetla).

3. Propusnost betona

Svojsvo propusnosti betona uvjetovano je različitim mehanizmima prolaska tvari. Tvar koja se transportira može biti voda ili plin te se onda radi o vodopropusnosti, odnosno plinopropusnosti. Ispitivanjem propusnosti betona mjeri se protok tekućine ili plina kroz beton zbog razlike tlaka. Ovisno o tome kakvo je stanje protoka ostvareno unutar pora u betonu, može se ispitivati pri stacionarnom ili nestacionarnom stanju [6]. Vodopropusnost i plinopropusnost betona bitno ovise o veličini pora i povezanosti pora. U klasičnom betonu s portland cementom, najveće pore su najčešće sadržane na sučelju cementa i agregata. Struktura pora bitno je drugačija kod samoslijegajućeg nego kod klasičnog betona. Zbog izostanka ugradnje vibriranjem koje uzrokuje neujednačenost strukture, samoslijegajući beton ima manju poroznost, a time i manju plinopropusnost od klasičnog betona. Dodatkom aditiva postiže se gušća smjesa, kao i odabirom manjeg vodocementnog omjera te se time smanjuje koeficijent propusnosti [7]. Primjenom nekih mineralnih dodataka postiže se također manja propusnost, npr. samoslijegajućem betonu koji ima dodatak letećeg pepela, vrijednost koeficijenta propusnosti je tek 30-40% vrijednosti koeficijenta klasičnog betona [8]. Ispitivanje propusnosti i određivanje koeficijenta prolaza fluida kroz beton bitni su zbog povezanosti između kretanja agresivnih tvari kroz mikrostrukturu betona i trajnosti betonskih konstrukcija.

3.1. Plinopropusnost betona

Kretanje plinova poput zraka, kisika i ugljikovog dioksida ovisi o količini vlage unutar betona. Za srednju vlažnost, koeficijent difuzije plinova iznosi $10^{-7} - 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ [9].

Zbog kompleksnosti projektiranja smjese samoslijegajućeg betona, rezultati brojnih eksperimentalnih istraživanja pokazuju vrlo različite rezultate [9]. Uzrok tome je i to što ne postoji standardizirani postupak ispitivanja plinopropusnosti. U ovom je radu plinopropusnost betona određena prema metodi Cambureaua. Za izračunavanje specifičnog koeficijenta propusnosti (2) korišten je Hagen-Poiseuilleov princip za laminarni tok stlačivog fluida kroz poroznu strukturu s malim kapilarama u stacionarnim uvjetima

$$K_n = \frac{2 \cdot Q \cdot p_a \cdot L \cdot \eta}{A(p^2 - p_a^2)}, \quad (2)$$

gdje je:

Q – protok volumena fluida (m^3/s),

A – površina poprečnog presjeka uzorka (m^2),

L – debljina uzorka u smjeru protoka (m),

η – koeficijent dinamičke viskoznosti (Ns/m^2),

p – ulazni tlak (apsolutni) (N/m^2),

p_a – izlazni tlak (atmosferski) (N/m^2).

Protok volumena fluida računa se prema (3):

$$Q = \frac{S_f \cdot L_f}{T_1 - T_0}, \quad (3)$$

gdje je:

S_f – površina poprečnog presjeka epruvete (m^2),

L_f – referentna duljina epruvete (m),

T_1 – vrijeme dolaska mjehurića kisika do vrha graduiranog dijela (s),

T_0 – vrijeme dolaska mjehurića kisika na početak graduiranog dijela (s).

3.2. Vodopropusnost betona

Vodopropusnost uvelike ovisi o karakteristikama cementa i agregata korištenog pri projektiranju smjese. Viša klasa samoslijegajućeg betona doprinosi manjem koeficijentu vodopropusnosti. Samoslijegajući betoni koji nema mineralnih dodatka, već dodatke za viskoznost, imaju značajno viši koeficijent vodopropusnosti od drugih samoslijegajućih betona u kojima je upotrijebljen prah vapnenca ili pulverizirani leteći pepeo kao punilo. Ispitivanja su pokazala da dodatnom silicijske prašine, letećeg pepela ili voska karnaube (brazilske voštane palme) također možemo smanjiti vodopropusnost samoslijegajućeg betona [9].

4. Provedba laboratorijskih ispitivanja

U Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci izrađeni su i ispitani uzorci referentnog samoslijegajućeg betona te samoslijegajućeg betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem.

4.1. Izrada mješavina samoslijegajućeg betona

Mješavine samoslijegajućeg betona izrađene su u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci 23.10.2015. Pripremljena je jedna mješavina referentnog samoslijegajućeg betona (oznaka uzoraka S0) i jedna mješavina samoslijegajućeg betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem (oznaka uzoraka S). Napravljena je samo jedna mješavina betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem za

potrebe prethodnog ispitivanja kako bi se provjerila mogućnost primjene vapnenog mulja iz proizvodnje acetilena. Tablicom 1 prikazan je sastav mješavina. Na osnovi podataka o kemijskom sastavu vapnenog mulja te usporedbom sa zahtjevima norme HRN EN 1008 zaključeno je da bi se najviše 27% vode za pripremu betona moglo zamijeniti vapnenim muljem tako da je za prvu probnu mješavinu odabrana vrijednost od 20%.

Pri izradi mješavina referentnog samoslijegajućeg betona te samoslijegajućeg betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem korišten je miješani portlandski cement CEM II/B-M (S-L) 42,5 N proizvođača Cemex.

Kao agregat korišten je drobljeni vapnenac iz nalazišta Mrkovac veličine zrna 0-16 mm. Pri izradi mješavina korištene su frakcije 0 – 4 mm, 4 – 8 mm i 8 – 16 mm.

Tablica 1. Sastav mješavina samoslijegajućeg betona

Sastavne komponente (kg/m³)	Referentni uzorci	Uzorci s vapnenim muljem
cement	250	250
leteći pepeo	84	84
voda	180	150
superplastifikator	12	12
0 do 4	782	755
filler	84	84
4 do 8 mm	390	378
8 do 16 mm	390	378
16 do 32 mm	-	-
gašeno vapno	-	30
vodovezivni omjer	0,54	0,54

4.2. Ispitivanje viskoznosti svježeg samoslijegajućeg betona

Ispitivanje viskoznosti svih mješavina samoslijegajućeg betona provedeno je samo s pomoću V-lijevka prema [11] budući da L-kutija nije bila dostupna u laboratoriju. Smjesi samoslijegajućeg betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem bilo je potrebno 18,40 s da prođe kroz lijevak, dok je smjesa referentnog betona prošla za 17,69 s.

4.3. Izrada uzoraka samoslijegajućeg betona

Od mješavine referentnog samoslijegajućeg betona napravljeno je pet uzoraka oblika kocke brida 150 mm te jedan uzorak oblika valjka promjera 150 mm i visine 300 mm. Od mješavine samoslijegajućeg betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem napravljeno je dvanaest uzoraka oblika kocke brida 150 mm te jedan uzorak oblika valjka promjera 150 mm i visine 300 mm. Uzorci oblika kocke korišteni su za ispitivanje tlačne čvrstoće i vodopropusnosti, a od uzoraka oblika valjka ispiljeni su manji uzorci za ispitivanje plinopropusnosti promjera 150 mm i visine 100 mm. Prilikom ugradnje, budući da se radi o samoslijegajućem betonu, nije primijenjeno vibriranje. Uzorci su raskalupljeni 24 sata nakon ugradnje te njegovani u vodi temperature $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ do 28 dana starosti.

4.4. Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka

Ispitivanja tlačne čvrstoće, provedena su 23.11.2015. nakon 28 dana njegovanja uzoraka u vodi. Ispitivanja su izvršena pomoću uređaja za multifunkcionalno ispitivanje materijala koji uključuje i opremu za ispitivanje tlačne čvrstoće betona. Uzorci su ispitani sukladno normi [12]. Ispitana su dva referentna uzorka te devet uzorka s vapnenim muljem. Tablicom 2 prikazani su podaci o dimenzijama, masi, gustoći te dobivenoj tlačnoj čvrstoći uzoraka. Prosječna tlačna čvrstoća referentnih uzoraka je 27,30 MPa, a uzoraka s vapnenim muljem 28,67 MPa.

Tablica 2. Dimenzije uzoraka i dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće pri ispitivanju na tlak

		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>Masa</i>	<i>Gustoća</i>	<i>Sila</i>	<i>Čvrstoća</i>
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]
Referentni beton	S0-1	150,33	150,44	150,35	8075,10	2374,85	635,0	28,08
	S0-3	148,05	150,55	150,29	8052,00	2403,72	590,8	26,51
SCC s vapnenim muljem	S-1	148,23	150,30	150,18	7930,00	2370,10	593,2	26,63
	S-2	148,19	150,17	150,00	8060,90	2414,85	525,0	23,59
	S-4	149,16	150,54	149,73	7940,10	2361,64	623,7	27,78
	S-5	150,68	150,61	150,04	8191,20	2405,64	740,7	32,64
	S-6	150,07	150,02	150,07	8108,00	2399,81	706,5	31,38
	S-7	149,94	150,29	149,92	8087,10	2393,79	657,5	29,18
	S-8	147,47	150,04	150,05	7858,20	2366,88	655,9	29,64
	S-10	150,95	150,19	150,83	8005,00	2340,99	651,2	28,73
	S-11	150,57	150,03	149,72	8073,80	2387,16	642,6	28,45

4.5. Ispitivanje prodora vode pod tlakom

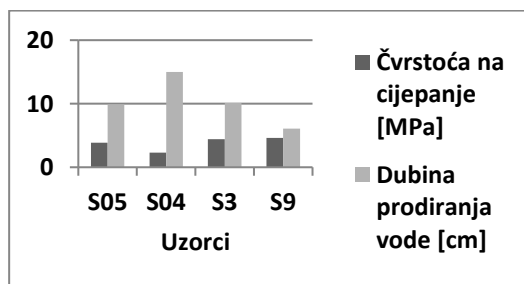
Vodopropusnost uzoraka odredila se ispitivanjem dubine prodiranja vode pod tlakom prema normi [13]. Uzorci su postavljeni u uređaj za ispitivanje vodopropusnosti betona te su se izlagali vodi pod stalnim tlakom od 5 bara u trajanju od 72 sata. Provedeno je ispitivanje tri referentna uzorka te tri uzorka sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem.

Tijekom ispitivanja povremeno su promatrani uzorci da bi se evidentiralo moguće curenje vode, što ima utjecaj na valjanost rezultata. Zbog toga su po jedan referentni uzorak i jedan uzorak betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem izuzeti iz daljnjeg ispitivanja. Nakon završetka izlaganja uzoraka djelovanju vode pod tlakom, provedeno je cijepanje uzoraka s pomoću uređaja za multifunkcionalno ispitivanje materijala. Na rascijepljenim je uzorcima identificiran trag prodora vode (Slika 1). Izmjerena je najveća dubina prodora vode na svakom uzorku te rezultat zaokružen na najbliži 1 mm. Veći prodor vode u uzorak betona znači veću vodopropusnost uzorka. Na Slici 1 prikazani su rascijepljeni uzorci i razina prodora vode pod tlakom. Uzorak referentnog betona S0-4 u potpunosti je bio ispunjen vodom i imao je najmanju čvrstoću na cijepanje 2.32 MPa. Uzorak samoslijegajućeg betona s vapnenim muljem S-9 imao je najveću čvrstoću na cijepanje 4.60 MPa, te je imao dubinu prodiranja vode od 6.1 cm.



Slika 1. Dubina prodiranja vode na ispitanim uzorcima

Dijagramom na slici 2 prikazan je odnos čvrstoće i dubine prodiranja vode na ispitanim uzorcima.



Slika 2. Odnos čvrstoće na cijepanje i dubine prodiranja vode u ispitanim uzorcima

4.6. Ispitivanje plinopropusnosti

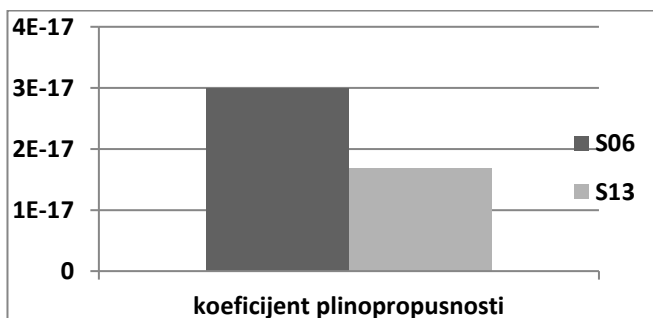
Ispitivanje plinopropusnosti provedeno je prema metodi Cambureau (Slika 3) u kojoj se uzorak oblika valjka promjera 150 mm i visine $(50 \pm 0,5)$ mm izlagan djelovanju kisika pod određenim tlakom u poznatim uvjetima okoline, odnosno tlaka i temperature.



Slika 3. Uređaj za ispitivanje plinopropusnosti metodom Cambureau

Ispitana su tri referentna uzorka ispiljena iz uzorka S0-6 i tri uzorka samoslijegajućeg betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem ispiljena iz uzorka S-13. Pomoću uređaja mjeri se potrebno vrijeme da mjehurić zraka prođe između dva graduirana dijela epruveta uređaja. Prosječni specifični koeficijent prolaska kisika K_n (Slika 4) izračunat je kao srednja vrijednost plinopropusnosti pri tlakovima od 1,5; 2; 2,5; 3 i 3,5 bara prema (4):

$$K_n = \frac{K_{1.5} * K_2 * K_{2.5} * K_3 * K_{3.5}}{5} \quad (4)$$



Slika 4. Rezultati mjerenja plinopropusnosti

Prema kriteriju prikazanom Tablicom 3, ispitivanja uzoraka pokazala su da se radi o betonu srednje kvalitete.

Tablica 3. Kriteriji kvalitete betona na temelju plinopropusnosti [14]

<i>Plinopropusnost (m²)</i>	<i>Plinopropusnost betona</i>	<i>Kvaliteta betona</i>
< 10 ⁻¹⁸	Mala	Dobar
10 ⁻¹⁸ - 10 ⁻¹⁶	Srednja	Srednji
> 10 ⁻¹⁶	Velika	Loš

5. Analiza rezultata ispitivanja

Na uzorcima samoslijegajućeg betona i samoslijegajućeg betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem ispitana je viskoznost V-lijevkom i tlačna čvrstoća te određena dubina prodiranja vode pod tlakom i specifični koeficijent plinopropusnosti.

5.1. Utjecaj zamjene dijela vode vapnenim muljem na svojstvo punjenja samoslijegajućeg betona

Rezultati ispitivanja svojstva punjenja pokazali su da samoslijegajućem betonu sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem treba 30% više vremena od preporučenog (5 do 14 s [3]) za punjenje posude te 20% više vremena nego što je to trebalo referentnoj samoslijegajućoj mješavini. Na duže je vrijeme istjecanja mogla utjecati prevelika količina krupnog agregata u projektiranom sastavu betona ili premala količina dodanog superplastifikatora.

5.2. Utjecaj zamjene dijela vode vapnenim muljem na tlačnu čvrstoću samoslijegajućeg betona

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pokazali su da samoslijegajući beton sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem ima 5% veću tlačnu čvrstoću od referentnog samoslijegajućeg betona. Točniji rezultati mogli bi se dobiti po ispitivanja većeg broja uzoraka.

5.3. Utjecaj zamjene dijela vode vapnenim muljem na plinopropusnost i vodopropusnost

Samoslijegajući beton sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem pokazao je veću otpornost na prodor vode i plinova. Vodootpornost samoslijegajućeg betona s vapnenim muljem bila je manja za 36%, a plinopropusnost za 43% u odnosu na iste parametre referentnog samoslijegajućeg betona. Takve rezultate, kao i malo veću čvrstoću,

možemo pripisati postojanju sitnih čestica kalcijeva hidroksida u vapnenom mulju koje zapunjavaju prostor između čestica sitnog agregata.

6. Zaključak

Na osnovi analize rezultata eksperimentalnih ispitivanja samoslijegajućeg betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem i referentnog samoslijegajućeg betona može se zaključiti sljedeće:

- pri izradi mješavina za nova ispitivanja morao bi se korigirati udio sitnog i krupnog agregata te povećati udio superplastifikatora da bi se zadovoljila svojstva punjenja i prolaza samoslijegajućeg betona u svježem stanju,
- mogućnost postizanja veće tlačne čvrstoće kod samoslijegajućih betona sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem treba dokazati ispitivanjem većeg broja uzoraka
- samoslijegajući beton sa zamjenom dijela vode vapnenim muljem ima manju vodopropusnost i plinopropusnost od referentnog samoslijegajućeg betona.

*Za provedbu eksperimentalnog dijela rada korištena je oprema nabavljena u okviru projekta **Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001)** koji je sufinanciran iz **Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR)** i **Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH**.*

Literatura

- [1] Naik, T.R., Kumar, R.: *Self-Compacting Concrete (SCC) or Self-Leveling Concrete (SLC)*, The University of Wisconsin Milwaukee, 2001.
- [2] The Self-Compacting Concrete European Project Group: *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use*, 2005.
- [3] <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF> pristupljeno 15.11.2015.
- [4] Ramasamy, P., Periathamby, A., & Ibrahim, S.: Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum filtration. *Waste management & research*, 20(6), 536-540, 2002.
- [5] Rana, A., Kalla, P., Csetenyi, L.J.: Sustainable use of marble slurry in concrete, *J. Clean. Prod.* 94, 304 – 311, 2015.
- [6] Bentz, D.P., Clifton, J.R., Ferraris, C.F., Garboczi E.J.: *Transport Properties and Durability of Concrete: Literature Review and Research Plan*, National Institute of Standards and Technology, 1999.

- [7] Wallevik, O.H., Nielsson I.: PRO 33: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Publications, 2003.
- [8] Schutter, G., Audenaert K.: Report 38: Durability of Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 205-DSC, RILEM Publications, 2007.
- [9] Cozmuta, I., von der Graaf, E.R.: Methods for Measuring Diffusion Coefficients of Radon in Building Material, *Science of The Total Environment*, Volume 272, Issues 1–3, 2001.
- [10] Mesquita, E.F.T., Moreira, K.M.V., Montenegro, I.N.S., Coelho, F.C.A.: Permeability of self-compacting concrete with Copernicia prunifera's wax, *World Journal of Engineering and Physical Sciences* Vol. 3 (2), pp. 014-021, 2015.
- [11] HRN EN 1008: 2002 Voda za pripremu betona – Specifikacija za uzorkovanje, ispitivanje i potvrđivanje prikladnosti vode, uključujući vodu za pranje iz instalacija za otpadnu vodu u industriji betona, kao vode za pripremu betona.
- [12] HRN EN 12350-9: 2010 Ispitivanje svježega betona -- 9. dio: Samozbijajući beton - Ispitivanje V-lijevkom.
- [13] HRN EN 12390-3: 2012 Ispitivanje očvrsluloga betona – 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka.
- [14] Bjegović, D., Serdar, M., Kožoman, E.: Utjecaj oplata kontrolirane propusnosti na mehanička trajnosna svojstva zaštitnog sloja betona, *Elektronički časopis Građevinskog fakulteta Osijek*, 1 (2012), 62 – 73.
- [15] HRN EN 12390-8: 2009 Ispitivanje očvrsluloga betona – 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom.

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE DINAMIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI MIKROARMIRANOG BETONA

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY FOR FIBER REINFORCED CONCRETE

Sven Kalinčević*, Marko Lettich*, Natalija Bede, Ivica Kožar****

Sažetak

Ovaj rad prikazuje eksperimentalno laboratorijsko ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti mikroarmiranog betona (MAB). MAB je posebna vrsta betona koja se sve više upotrebljava u graditeljstvu pa je potrebno razviti efikasne metode određivanja njegovih mehaničkih karakteristika. Dvije osnovne grupe metoda ispitivanja mehaničkih karakteristika betona su razorna i nerazorna metoda. Laboratorijsko određivanje dinamičkog modula elastičnosti je provedeno primjenom nerazorne rezonantne metode ispitivanja uz korištenje impulsnog čekića, a vlastite frekvencije su određene kao rezonantni vrhovi funkcije frekventnog odgovora.

Ključne riječi: *dinamički modul elastičnosti, mikroarmirani beton, nerazorna metoda ispitivanja, impulsni čekić*

Abstract

This article shows experimental laboratory testing of dynamic elastic modulus of fiber-reinforced concrete (FRC). FRC is a special type of concrete which is being used more often nowadays. Therefore, efficient methods of determining its mechanical characteristics should be developed. There are two main groups of methods for determining mechanical characteristics of materials: desctructive and nondestructive methods. Nondestructive impact hammer testing is used in this experiment to obtain

*Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: {sven.kalincevic, marko.lettich}@student.uniri.hr

**Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: {natalija.bede, ivica.kozar}@gradri.uniri.hr

the dynamic elastic modulus of FRC and natural frequencies are determined as resonant peaks from Frequency Response Function.

Key words: *dynamic elastic modulus, fiber-reinforced concrete, nondestructive test method, impact hammer*

1. Uvod

Cilj ovog rada je eksperimentalno određivanje dinamičkog modula elastičnosti mikroarmiranog betona (MAB) nerazornom metodom ispitivanja. Glavna ideja je ustanoviti pouzdanost nerazorne rezonantne metode ispitivanja za procjenu dinamičkog modula elastičnosti MAB iz eksperimentalno određenih vlastitih frekvencija uz upotrebu impulsnog čekića. Rezultati dinamičkog modula elastičnosti dobiveni ovim ispitivanjem služiti će kao referentni podaci za planirana buduća razorna ispitivanja te utvrđivanje točnosti nerazorne metode.

2. Mikroarmirani beton

MAB predstavlja suvremeni kompozitni materijal koji je dobiven zahvaljujući ojačanju cementne matrice pomoću ravnomjerno raspršenih različitih vrsta vlakana (čeličnih, sintetičkih, ugljikovih ili staklenih vlakana). Ova vrsta betona predstavlja složeni beton gdje se jasno mogu razlikovati dvije komponente, osnovni materijal - matrica i dodatni materijal - mikroarmatura. Osnovni zadatak mikroarmature je poboljšanje karakteristika osnovnog materijala, a posebice povećanje čvrstoće i duktilnosti kompozita [1].

U odnosu na obični beton, MAB ima mnogobrojne prednosti kao što su veća žilavost i deformabilnost, veća otpornost na habanje i udar, veća trajnost i duktilnost te veća sposobnost apsorpcije energije, dok je sama priprema mikroarmiranog betona nešto složenija. Prilikom pripreme svježeg betonske mješavine posebice je važno voditi računa o načinu dodavanja vlakana. Prije dodavanja vlakna u betonsku mješavinu potrebno ih je razdvojiti, a tokom dodavanja ravnomjerno raspršiti. Time se sprječava petljanje vlakana i grudanje mješavine koji doprinose smanjenju obradivost svježeg betona, odnosno ugradnja betona postaje otežana ili čak nemoguća (Slika).

Primjena MAB danas je vrlo raširena. Koristi se za izradu podova i kolničkih konstrukcija gdje su opterećenja velika (npr. avionskih pista), kao mlazni beton u tunelogradnji, za izradu predgotovljenih tankostjenih betonskih elemenata te kod sanacije oštećenih betonskih elemenata.



Slika 1. Grudanje betonske mješavine

3. Nerazorna rezonantna metoda ispitivanja

Nerazorne metode ispitivanja čine skup metoda temeljen na principu mjerenja fizikalnih parametara sa svrhom utvrđivanja svojstava materijala te otkrivanja različitih vrsta defekata, a da se pritom ne utječe na funkcionalnost objekta koji se ispituje [2]. Razvijene su brojne nerazorne metode za ispitivanje betona [3], a u ovom radu naglasak je dan na rezonantnu metodu.

Rezonantna metoda se temelji na mjerenju rezonantne frekvencije a, ovisno o načinu mjerenja, mogu se odrediti frekvencije uzdužnih, savojnih ili torzijskih vibracija normiranih prizmatičnih i cilindričnih uzoraka [4]. Osnovna prednost rezonantne metode je jednostavnost i efikasnost, a glavni nedostatak se očituje u ovisnosti o obliku i dimenzijama uzorka.

Sukladno normama ASTM C215 [4] i EN 14146 [5] provedeno je ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti MAB primjenom rezonantne metode uz korištenje impulsnog čekića. Princip metode se bazira na mjerenju ulaznih funkcija pobude (udarna sila čekića) i izlaznih funkcija odgovora (akceleracija) uzorka tijekom vremena. Korištenjem algoritma brze Fourierove transformacije vremenski zapisi pretvoreni su u spektralne funkcije pobude i odgovora. Iz omjera spektralne funkcije pobude i odgovora određuje se funkcija frekventnog odgovora (Frequency Response Function – FRF), a vlastite vrijednosti su određene kao rezonantni vrhovi FRF-a. Ovaj način mjerenja daje pouzdanije rezultate vlastitih vrijednosti te predstavlja napredak u odnosu na određivanje vlastitih vrijednosti primjenom rezonantne metode prema normama [4] i [5].

4. Eksperimentalna istraživanja

Eksperimentalna istraživanja u ovom radu provedena su u laboratoriju Zavoda za računalno modeliranje materijala i konstrukcija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

4.1. Mješavina betona

Za izradu ispitnih uzoraka korištena je receptura navedena u Tablica 1. Potrebni volumen određen je prema broju ispitnih uzoraka koji se želio izraditi. Korišten je Portland bijeli cement 52,5 R, kvarcni pijesak promjera zrna 0,1-0,6 mm, ravna čelična vlakna duljine 13 mm i promjera 0,2 mm.

Tablica 1. Receptura mikroarmiranog betona

Sastojak	1,0 kg/ m ³	0,059 kg/m ³
Cement	435,2	25,48
Silicijska prašina	108,8	6,37
Voda	272,00	15,93
Čelična vlakna	200,00	11,71
Kvarcni pijesak	1312,00	76,82
Superplastifikator	48,00	2,81

Količina čeličnih vlakana koja se dodaju mješavini ovisi prvenstveno o obliku vlakana. Oblik ravnih vlakana se često opisuje preko omjera duljine i promjera vlakna. Čelična vlakna korištena u ovom ispitivanju imaju omjer duljine i promjera jednak 65. Zbog sprječavanja grudanja vlakana, volumni udio vlakana u mješavini se ograničava na otprilike 2% za vlakna srednjih omjera duljine i promjera [6]. Osim utvrđivanja količine čeličnih vlakana koja se dodaju mješavini, za prevenciju grudanja betonske mješavine bitno je pravovremeno dodavanje vlakana i sama dinamika dodavanja vlakana. Vlakna se nikada ne dodaju na početku zajedno sa ostalim suhim sastojcima, nego u svježi beton koji je dovoljno obradiv da se prilikom miješanja osigura što homogeniji raspored vlakana. Iz istog se razloga vlakna dodaju u betonsku mješavinu za vrijeme procesa miješanja, a ne odjednom [6].

Postupak miješanja se sastojao od sljedećih koraka:

- ubacivanje suhih sastojaka (cement, silicijska prašina i kvarcni pijesak) u miješalicu;
- miješanje u miješalici 15 sekundi;
- dodavanje vode i superplastifikatora;
- miješanje u miješalici 45 sekundi;
- ručno miješanje, te mirovanje 3 minute;
- miješanje uz ravnomjerno dodavanje vlakana 3 minute.

4.2. Ispitni uzorci

Beton se ugrađivao odmah nakon miješanja u prethodno pripremljene i nauljene kalupe. Detaljni pregled svih izrađenih uzoraka naveden je u Tablica 2. U ovom radu, za određivanje dinamičkog modula udarnim čekićem korištene su tri prizme dimenzija $100 \times 100 \times 400$ mm (oznaka S3, Tablica 2). Detaljniji podaci triju ispitnih prizmi su dani u Tablica 3. Za ispitivanje tlačne čvrstoće korištene su tri kocke dimenzija 150 mm. Preostali uzorci će se koristiti za buduća planirana ispitivanja.

Tablica 2. Nazivi, dimenzije i broj pripremljenih uzoraka

Naziv uzorka	Širina, b [mm]	Visina, h [mm]	Duljina, l [mm]	Volumen, V [m ³]	Broj uzoraka	Ukupni volumen
S1	40	40	160	0,000256	3	0,000768
S2	50	50	200	0,0005	3	0,0015
S3	100	100	400	0,004	6	0,024
Kocka	150	150	150	0,003375	7	0,023625
Valjak	150	300	-	0,005299	2	0,010598

Tablica 3. Dimenzije, masa i gustoća triju ispitnih prizmi iz grupe uzorka S3

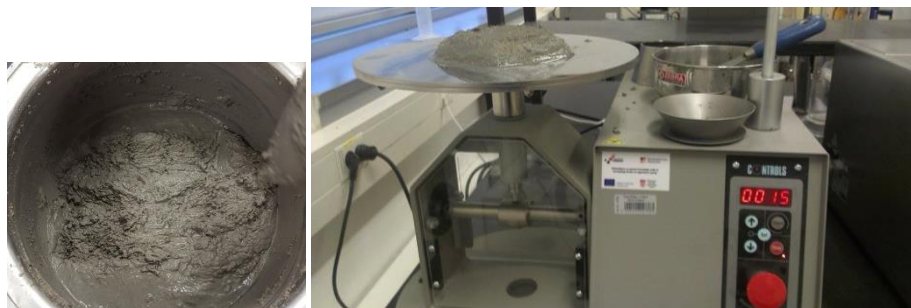
Naziv uzorka	Širina, b [mm]	Visina, h [mm]	Duljina, l [mm]	Masa, m [kg]	Volumen, V [m ³]	Gustoća, [kg/m ³]
3A	100,76	101,30	399,50	8,890	0,004078	2180,16
3B	100,54	100,18	400,00	8,675	0,004029	2153,23
3C	99,50	100,21	400,00	8,650	0,003988	2168,81

Nakon ugrađivanja u kalupe, kalupi napunjeni svježim betonom vibrirani su 30 sekundi. Očekivana obradivost je zbog velikog vodocementnog omjera i upotrebe superplastifikatora trebala biti velika, međutim pokazala se kao loša. Superplastifikator je nakon određenog vremena mirovanja betona povećao izvlačenje vode te se mješavina ručno zamiješala kako bi se smanjio taj efekt (Slika 2, lijevo). Nakon jednog dana stvrdnuti beton je pažljivo izvađen iz kalupa te je stavljen na njegovanje sukladno normi HRN EN 12390-2 ukupno 28 dana.

4.3. Rezultati ispitivanja kvalitete betona

4.3.1. Ispitivanje betona u svježem stanju

Konzistencija svježeg betona ispitana je uređajem za ispitivanje konzistencije mortova sukladno normi HRN EN 1015-3. Nakon završetka miješanja i prije ugradnje betona u kalupe, svježi beton je ručno zamiješan. Pripremljeni kalup krnjeg stošca visine 20 cm i promjera 10 cm na potresnom stoliću punjen je u dva sloja i svaki sloj je nabijen drvenim batom 10 puta. Nakon popunjavanja kalupa i mirovanja od 15 sekundi, kalup je podignut. Podizanje i spuštanje stolića je obavljeno 15 puta te su izmjerena dva okomita promjera od 15 cm (Slika 2, desno). Nakon 10 minuta ponovljen je postupak i tada dobiveni promjeri iznosili su 16,5 cm.



Slika 1. (lijevo) Svježa betonska mješavina; (desno) Ispitivanje konzistencije svježeg betona

4.3.2. Ispitivanje očvrstlog betona

Ispitivanje tlačne čvrstoće betona je obavljeno prema normi HRN EN 12390-3 na 3 uzorka kocke dimenzija 150 mm starosti 28 dana. Dobiveni rezultati prikazani su u Tablica 4. Također su procijenjene vrijednosti modula elastičnosti uzoraka iz korelacije s tlačnom čvrstoćom prema izrazu (1) (Tablica 4):

$$E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \quad (1)$$

Gdje je:

E_{cm} – sekantni modul elastičnosti

f_{ck} – tlačna čvrstoća betona

Tablica 4. Tlačne čvrstoće uzoraka

Uzorak	Masa [kg]	Gustoća [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [MPa]	E [GPa]
Kocka 1	7,395	2194,3	43,54	35,35
Kocka 2	7,340	2204,8	44,37	35,54
Kocka 3	7,320	2172,2	43,05	35,24

4.4. Metodologija ispitivanja

Pri ispitivanju korištena je sljedeća oprema:

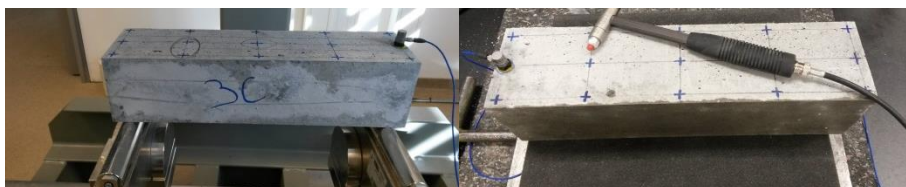
- ICP udarni čekić, model 086C03 proizvođača PCB Piezotronics, osjetljivosti 2,25 mV/N, raspona mjerenja ± 2200 N pk, rezonantne frekvencije >22 kHz,
- Piezoelektrični akcelerometar opće namjene, model 352C33, proizvođača PCB Piezotronics, osjetljivosti 100 mV/g, raspona mjerenja ± 50 g pk, raspona mjerenja frekvencije $\pm 0,5 - 10\,000$ kHz, rezonantne frekvencije >50 kHz
- Sound and Vibration Data Acquisition model NI USB-4431 sa jednim 24 – bitnim izlazom i četiri 24 – bitna analogna ulaza, sa $\pm 3,5$ V izlaznog raspona i ± 10 V ulaznog raspona i 100 dB dinamičkog raspona.

Ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti MAB primjenom impulsnog čekića su provedena mjerenjem rezonantnih frekvencija savojnih vibracija prizmatičnih uzoraka. Prije samog početka ispitivanja, na gornjoj površini prizme iscrtan je raster s 15 točaka koje označavaju mjesto nanošenja pobude pomoću udarnog čekića (Slika 4 i 4). Odgovor na pobudu se mjerio akcelerometrom pričvršćenim na gornjoj površini prizme, 50 mm od bočnog brida prizme, kako je prikazano na Slici 4. Dakle, udarac čekićem pobuđuje vibracije uzorka koje akcelerometar registrira kao ubrzanje. Signali sile i akceleracije iz vremenske domene, korištenjem algoritma brze Fourierove transformacije, pretvoreni su u spektralne funkcije odgovora i pobude iz čijeg se omjera određuje funkcija frekventnog odgovora (FRF).

Za svaku točku test se ponavljao tri puta. Također, ispitivanje se provelo za dva različita načina oslanjanja. Ispitivanje za prvi način oslanjanja, kontinuirano oslanjanje na spužvi, provedeno je na podlozi od spužvi veličine $37 \times 30 \times 6,5$ cm i gustoće $39,64$ kg/m³ (Slika 4, desno). Drugi način ispitivanja uzorka je slobodno oslonjena greda preko dva oslonca raspona 350 mm, kakav se koristi prilikom ispitivanja grede na savijanje (Slika 4, lijevo).



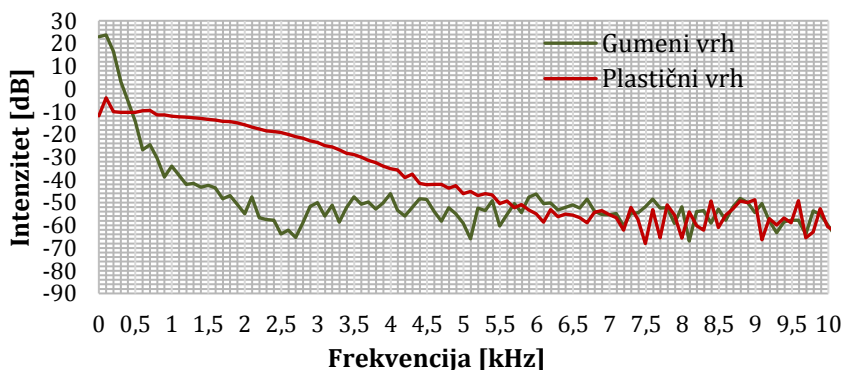
Slika 3. Shema rastera točaka na ispitnim uzorcima



Slika 4. (lijevo) Položaj akcelerometra i raster točaka na gredi; (desno) Akcelerometar, impulsni čekić i greda s rasterom

4.5. Preliminarna ispitivanja radi odabira odgovarajućeg vrha čekića

Vrh glave korištenog impulsnog čekića može se obložiti s 4 različita vrha - 2 gumena (super mekani i mekani), plastični (srednje tvrdoće) i čelični (tvrdi). Prema tome, prije ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti, potrebno je odabrati odgovarajući vrh čekića. Izbor vrha ovisi o tome koje nas frekventno područje zanima: udarcem u ispitni uzorak čekićem sa mekanim vrhom pobuđujemo samo niže frekvencije, dok sa tvrdim vrhom područje pobude je značajno šire i obuhvaća više frekvencije.



Slika 2. Frekventno područje pobude u ovisnosti o vrhu čekića

Uspoređivanjem rezultata ispitivanja dobivenih primjenom različitih vrhova čekića došlo se do zaključka da ovom ispitivanju najbolje odgovara plastični nastavak srednje tvrdoće čijom upotrebom je pobuda na području

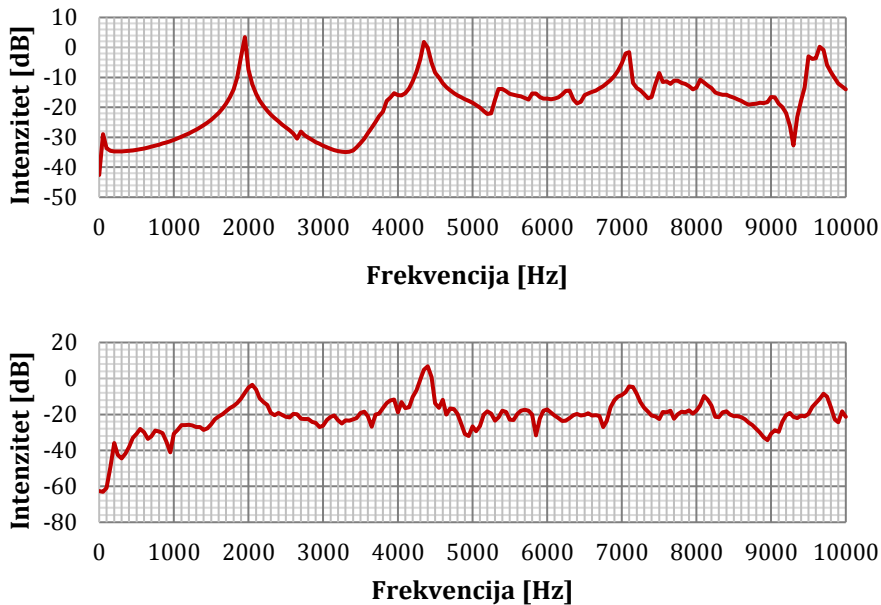
do 7 kHz zadovoljavajućeg intenziteta za pronalaženje nekoliko prvih vlastitih frekvencija uzorka. Slika 5. prikazuje usporedbu područja pobude primjenom super mekanog gumenog i srednje tvrdog plastičnog vrha.

4.6. Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti

Ispitivanja su provedena snimanjem signala pobude i odziva za svaku od 15 točaka za dva različita načina oslanjanja. Položaj akcelerometra prilikom ispitivanja je fiksna (vidi Slika 4.). Postavke unutar softvera su podešene da se signali počnu bilježiti sa trenutkom udarca impulsnim čekićem u ispitni uzorak i da vrijeme bilježenja signala traje 2 sekunde. Impulsni čekić prilikom udarca treba biti okomit na uzorak, a svaki eventualni dupli udarac koji se dogodi zbog odskoka čekića se odbacuje te se udarac ponavlja.

Nakon procesiranja signala i provođenja brze Fourierove transformacije (signali su iz vremenske domene transformirani u frekvencijsku domenu), dobivena je funkcija frekventnog odgovora za svaku točku rastera (Slika 3). Iz grafova su jasno vidljive vlastite frekvencije uzorka koje se očituju kao rezonantne vrijednosti (engl. *peak*) - lokalni maksimumi u grafu. Za svaki uzorak su izračunate vlastite frekvencije (f_n , $n = 1, 2, 3$) kao prosječne vrijednosti vlastitih frekvencija po pojedinoj točki, npr. FRF za svaku pojedinu točku je dobivena kao srednja vrijednost 3 funkcije proizašle iz 3 udarca (Tablica 5).

Usporedbom rezultata (Tablica 5) se zaključuje da način oslanjanja nema utjecaja na vlastite frekvencije uzorka. Razlog tomu je što se u oba slučaja dobiju vlastite frekvencije koje odgovaraju slučaju elastičnog oslanjanja grede. U prvom slučaju, kada je greda oslonjena kontinuirano na spužvi, dobiveni su zapisi na kojima su vlastite frekvencije bolje izražene. U drugom slučaju, kod oslanjanja preko 2 oslonca, zbog velike krutosti grede na savijanje (i odnosa L/H) ona pri impulsnoj pobudi i dalje vibrira kao da je elastično oslonjena.



Slika 3. Funkcija frekventnog odgovora (FRF) za točku 6 za uzorak prizme 3A kontinuirano oslonjen na spužvi (gore) i oslonjen na 2 oslonca (dolje).

Tablica 5. Prve 3 vlastite frekvencije uzoraka

Rubni uvjet	Uzorak	Vlastita frekvencija, f_n [Hz]		
		f_1	f_2	f_3
Kontinuirano oslanjanje na spužvi	3A	1950,00	4335,71	7100,00
	3B	1900,00	4300,00	7050,00
	3C	1950,00	4392,86	7150,00
	Standardna devijacija, σ [Hz]	$4,55 \times 10^{-13}$	97,76	0,00
Slobodno oslonjena greda preko 2 oslonca	3A	2078,57	4400,00	7114,29
	3B	2050,00	4342,86	7060,71
	3C	2046,43	4389,29	7050,00
	Standardna devijacija, σ [Hz]	176,69	21,46	12,20

U nastavku su izračunati dinamički moduli elastičnosti prema normama ASTM C215 i EN 14146, uz korištenje prve vlastite frekvencije [4] i [5].

Norma ASTM C215 predlaže računanje preko izraza (2):

$$E_d = C \times M \times n^2 \quad (2)$$

Gdje je:

E_d – dinamički modul elastičnosti [Pa],

$C = 0,9464 \text{ (L}^3\text{T/bt}^3\text{) [N}\cdot\text{s}^2\text{(kg}\cdot\text{m}^2\text{)]}$ za prizmu,

M – masa uzorka [kg],

n – prva vlastita frekvencija uzorka [Hz],

T – korekcijski faktor koji za korištene ispitne prizme iznosi 1,39 [4].

Prema normi EN 14146 se dinamički modul elastičnosti računa prema izrazu (3) (pretpostavljeno da je Poissonov koeficijent 0,3):

$$E_d = 15,136 \times 10^{-6} \times l^2 \times F_F^2 \times \rho \times C \quad (3)$$

Gdje je:

E_d – dinamički modul elastičnosti [MPa],

l – duljina uzorka [m],

F_F – prva vlastita frekvencija uzorka [Hz],

ρ – gustoća uzorka [kg/m³],

C – korekcijski faktor koji za korištene ispitne prizme iznosi 1,45 [5].

Izračunate vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti su dane u Tablica 6.

Tablica 6. Vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti, E_d , izraženih u GPa

Rubni uvjet	Uzorak	3A	3B	3C
Kontinuirano oslanjanje na spužvi	Norma	E_d [GPa]		
	ASTM C215	27,07	26,08	27,66
	EN 14146	29,04	27,30	28,96
Slobodno oslonjena greda preko 2 oslonca	Norma	E_d [GPa]		
	ASTM C215	30,76	30,36	30,46
	EN 14146	32,99	31,78	31,89

5. Zaključak

U ovom radu primijenjena je nerazorna rezonantna metoda ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti MAB primjenom impulsnog čekića. Na temelju provedenih ispitivanja i analize podataka dobivenih za dvije vrste rubnih uvjeta (za koje su izmjerene male varijacije vrijednosti frekvencija) zaključeno je da je primjenjivana metoda ispitivanja točna i robusna. Također, primijećeno je da su eksperimentalno dobivene vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti nešto niže od vrijednosti dobivenih iz korelacije s tlačnom čvrstoćom.

U nastavku istraživanja ispitati će se dinamički modul elastičnosti pri savijanju razornom metodom. Rezultat dobiven u ovom radu će u potpunosti biti usporediv sa rezultatom dobivenim razornom metodom. Također, istražiti će se i utjecaj veličine uzorka (engl. *size effect*) na rezultate dobivene korištenom rezonantnom metodom ispitivanjem na prizmama dimenzija $40 \times 40 \times 160$ mm i $50 \times 50 \times 200$ mm. Dakle, daljnja ispitivanja bi trebala dati više informacija o stupnju točnosti primjenjivane metode.

Zahvala. Autori se zahvaljuju na pomoći prilikom rada u laboratoriju doc. dr. sc. Silviji Mrakovčić i laborantu Ivi Čakariću.

Literatura

- [1] M. Uljarević, B. Grujić i Ž. Grujić, »Primjena mikroarmiranog prskanog betona u tunelogradnji,« *Zbornik radova*, 2013.
- [2] NDT Resource Center, »About NDT,« [Mrežno]. Available: <https://www.nde-ed.org/AboutNDT/aboutndt.htm>.
- [3] I. Banjad Pečur, N. Štirmer i J. Galić, »Ispitivanja polimerom modificiranog betona nerazornim metodama,« *Građevinar*, svez. 61, br. 07, pp. 655-662, 2009.
- [4] ASTM C125 Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, 2002.
- [5] EN 14146. Natural stone test methods - Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency), 2004.
- [6] ACI Committee, »544.3R Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete,« 1998.

IDEJNO RJEŠENJE BRANE KRIŽ POTOK

CONCEPTUAL DESIGN OF KRIŽ POTOK DAM

Domagoj Vincek*, Goran Volf*, Barbara Karleuša*

Sažetak

U radu je prikazano idejno rješenje brane i akumulacije Križ potok kojoj je osnovna namjena vodoopskrba Gorskog Kotara te zaštita od velikih voda, a moguće je i korištenje akumulacije u hidroenergetske svrhe što je potrebno detaljnije analizirati. Prvotno rješenje brane predloženo je projektima od strane Hrvatskih voda. Ovim radom predloženo je rješenje kojim je određena druga lokacija pregradnog profila koja osigurava veći volumen akumulacije. Odabran je tip brane i pomoćnih građevina koji najbolje odgovaraju postojećim uvjetima na terenu. Za izvedbu je odabrana nasuta brana s kamenim nabačajem i nakošenom glinenom jezgrom. Predviđeni pomoćni objekti brane u idejnom rješenju su bunarski preljev, zatvaračnica temeljnog ispusta, kontrolna galerija te zahvat vode za vodoopskrbu.

Ključne riječi: *nasuta brana s kamenim nabačajem, Križ potok, akumulacija, pomoćne građevine*

Abstract

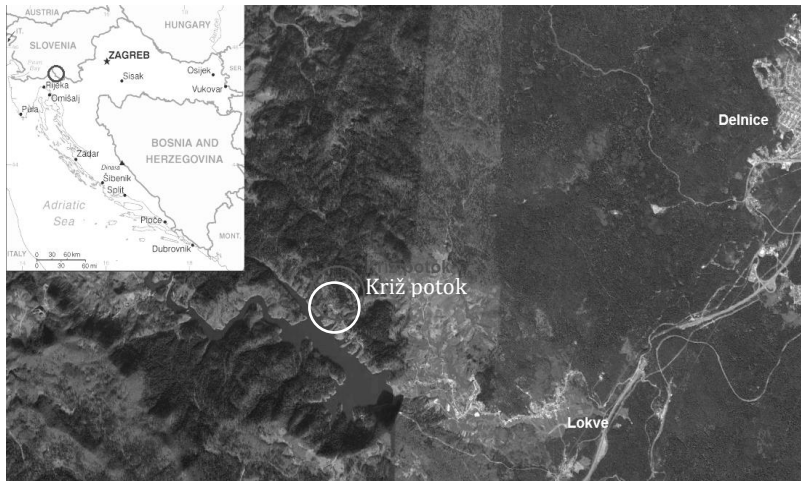
The paper presents conceptual design of the dam and reservoir Križ potok which main purpose is flood protection and water supply of Gorski Kotar. Also, with proper detail investigations there is a possibility to use the water from the reservoir for electricity production. Original solution of the dam was proposed by Croatian waters' designs. The dam solution presented in this paper gives new location of barrier profile which provides a larger reservoir volume. New proposed type of the dam with auxiliary structures fulfils the existing conditions on the field. The type of the proposed dam is a rockfill dam with sloping clay core. Provided auxiliary structures of the dam are the morning glory spillway, the outlet lock chamber, the control gallery and the intake for water supply.

Key words: *rockfill dam, Križ potok, reservoir, auxiliary structures*

* Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: vincek.domagoj@gmail.com, {goran.volf, barbara.karleusa}@uniri.hr

1. Uvod

Brana i pripadajuća akumulacija Križ potok planiraju se graditi uz sjeveroistočni rub Lokvarskog jezera, odnosno 400 m sjeverno od crpne postaje na vodotoku Križ potok (Slika 1) prema postojećoj tender dokumentaciji Hrvatskih voda (Varijanta 1) [1]. Područje izgradnje se nalazi na pogodnom prirodnom položaju sa povoljnim hidrogeološkim odnosima. Svrha izgradnje brane i akumulacije Križ potok je snabdijevanje područja Gorskog Kotara pitkom vodom, ali i zadržavanja velikih vodnih valova. S obzirom da su procijenjene godišnje potrebe Gorskog Kotara za vodom u vrijednosti od oko 6.5 mil. m³, a predviđena akumulacija volumena 17 mil. m³ javljaju se mogućnosti iskorištavanja akumulacije i u hidroenergetske svrhe (nije razmatrano u ovom radu) te spajanje na vodoopskrbnu mrežu Istre koja ima problema sa snabdijevanjem pitkom vodom tokom ljetnih mjeseci [1].

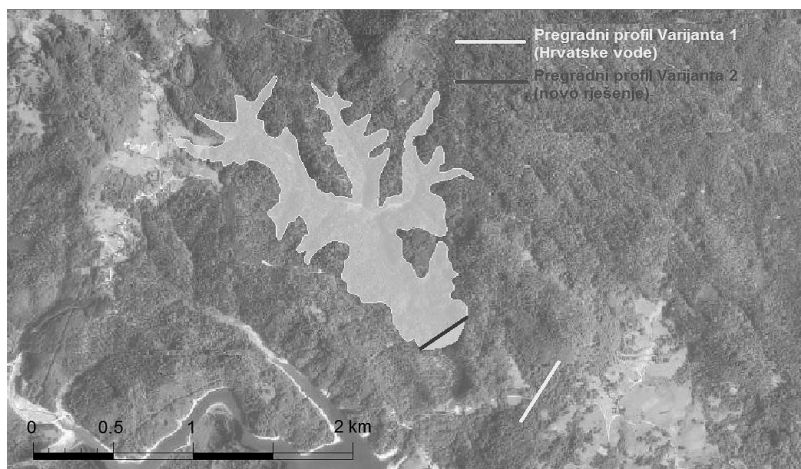


Slika 1. Lokacija Križ potoka.

Izgradnja brane predložena ovim radom (Varijanta 2) planirana je na najužem dijelu kanjona Križ potok gdje se može postići najveća iskoristivost akumulacije uz najmanje štetnog djelovanja na okoliš i okolno stanovništvo. Izgradnja nasute brane planirana je na način da se iskoriste materijali koji se nalaze na samom mjestu izgradnje. Uz samu branu također je potrebno izgraditi i pristupne putove te prateće objekte za održavanje brane, odnosno iskorištavanje akumulacije u svrhu vodoopskrbe [2].

2. Odabir lokacije pregradnog profila

Prvotno rješenje lokacije brane i akumulacije (Varijanta 1) dano je od strane Hrvatskih voda [1]. Lokacijom brane i akumulacije koja je predložena u ovome radu (Varijanta 2) postiže se mogućnost podizanja visine brane te povećanje volumena akumulacije [2]. Nova lokacija pregradnog profila predviđena je oko 0.8 km uzvodno od lokacije dane od strane Hrvatskih voda (slika 2). Na slici 2 također je prikazan smještaj brane i akumulacije koja je predviđena ovim radom.



Slika 2. Prostorni smještaj brane i akumulacije Križ potok.

Pomicanjem položaja osi brane za samo 0.8 km uzvodno od položaja koji je predložen od strane Hrvatskih voda postiže se gotovo dvostruko veći volumen akumulacije, a za neznatno nadvišenje brane od 4 m s obzirom na njenu ukupnu visinu. Također novi pregradni profil predviđa i kraći pregradni profil za 100 m od prvotnog rješenja.

Neke od karakteristika predviđene akumulacije Križ potok (Varijanta 2) prikazane su u tablici 1.

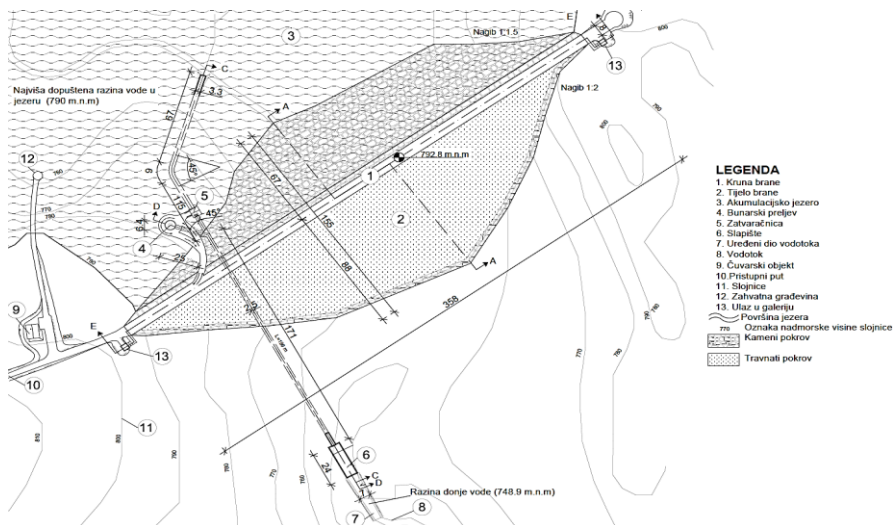
Tablica 1. Karakteristike akumulacije Križ potok (Varijanta 2).

Površina akumulacije	1,135,307 m ²
Opseg akumulacije	13,822 m
Ukupni volumen akumulacije	17,092,265 m ³
Operativni volumen	15,986,439 m ³
Rezervni volumen	1,582,000 m ³
Mrtvi prostor	18,851 m ³

3. Tehnički opis brane (Varijanta 2)

Na predviđenoj lokaciji odabrana je izgradnja heterogene nasute kamene brane sa zakošenom glinenom jezgrom te zatravljenom nizvodnom kosinom na zemljanoj podlozi. Glinenu jezgru štite troslojni filtarski slojevi. Filtarski slojevi se sastoje od srednjezrnatog i krupnozrnatog pijeska, te šljunka. Širina slojeva je 2.10 m na vrhu te 4.50 m na dnu brane. Ispod brane je predviđena izgradnja injekcijske zavjese do dubine od 20 m. Visina brane iznosi 42 m, dok je dužina brane u kruni 358 m. Uzvodna kosina je nagiba 1:1.5, dok je nizvodna kosina nagiba 1:2. Širina krune brane iznosi 8 m i nalazi se na koti 792.8 mn.m. Preko krune brane predviđena je pristupna cesta koja vodi na suprotnu stranu brane, te zatvaračnici i preljevu preko pristupnog mosta koji se spaja na pristupnu cestu na kruni brane.

Na slici 3 prikazan je tlocrt gotove brane sa svim potrebnim elementima.



Slika 3. Tlocrt brane sa svim elementima [2].

Tijekom gradnje brane voda se evakuira provodnicima tečenjem sa slobodnim vodnim licem kroz armirano-betonski obilazni tunel promjera 3.3 m, dužine 294 m te pada dna 1.2 %. U svrhu zaštite gradilišta od voda predviđena je gradnja uzvodnog i nizvodnog nasutog zagata koji se nakon izgradnje brane uklanjaju. Visina donjeg zagata iznosi 1.90 m sa nagibom pokosa 1:1.5, a visina gornjeg zagata je 6 m sa istim nagibom pokosa.

Tunel za evakuaciju velikih voda se u kasnijoj fazi gradnje prenamjenjuje u temeljni ispušt, a na mjestu zatvaračnice se radi suženje cijevi na promjer od 2.5 m. Na ulazu u tunel nalazi se zaštitna rešetka, a zatvarač je postavljen na udaljenosti od 101 m od ulaznog segmenta. Toranj

zatvaračnice visok je 43.60 m i tlocrtnih dimenzija 6.60 m i 5.90 m. Unutar zatvaračnice se nalazi i aeracijska cijev površine 1.0 m². Evakuacija velikih voda je predviđena pomoću bunarskog preljeva promjera 6.4 m i promjera evakuacijske cijevi od 2.5 m koja se spaja na cijev temeljnog ispusta na udaljenosti od 25 m od osi tornja preljeva. Duljina evakuacijske cijevi iznosi 196 m, a visina tornja 38.5 m.

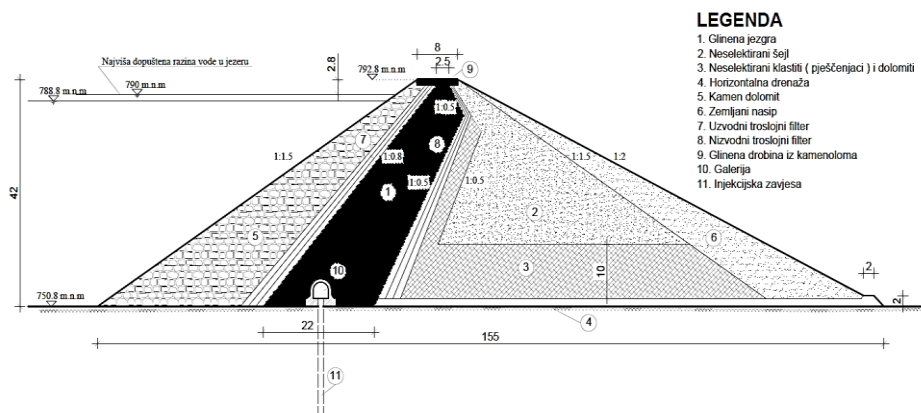
Bunarski preljev i temeljni ispust spajaju se u zajedničko slapište dužine 24 m i širine 7 m. Vodni skok nije potopljen te je predviđeno produbljenje slapišta (izvedba bučnice) od 2.9 m, a ukupna visina bočnih zidova sa produbljenjem iznosi 7.4 m. Predviđeno je i uređenje nizvodnog dijela vodotoka u dužini od 15 m.

Za predviđeni volumen akumulacije od 17,092,265 m³ dobiveno vrijeme pražnjenja akumulacije iznosi oko pet dana.

4. Karakteristike brane i grafički prilozi

4.1. Odabir poprečnog presjeka brane

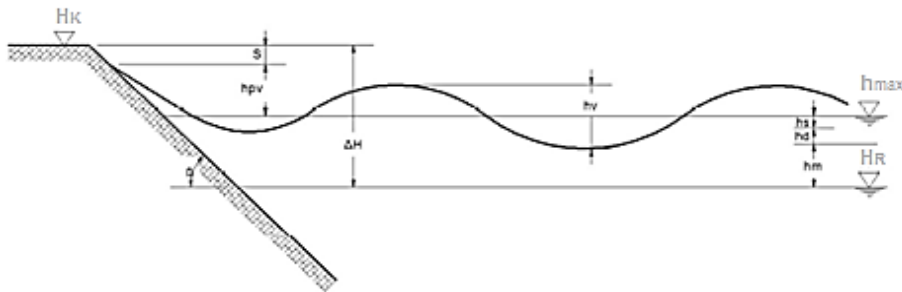
Poprečni presjek brane određen je po uzoru na branu Lokvarku koja se nalazi u neposrednoj blizini promatranog područja brane i akumulacije Križ potok koje je također i slične geološke građe [3]. Na slici 4 prikazan je karakteristični poprečni presjek brane sa svim potrebnim elementima. Osnovu brane čini glinena jezgra kojom se osigurava vododrživost. Jezgru štite troslojni filtri, na koje se uzvodno nadovezuje nabačaj od kamena dolomita, a nizvodno imamo naslage šejlova, klastita i dolomita te zemljanog nasipa kojim se postiže veća stabilnost brane. U dnu jezgre predviđena je izvedba kontrolne galerije. Za zaustavljanje procjeđivanja ispod tijela brane predviđa se izvedba injekcijske zavjese.



Slika 4. Karakteristični poprečni presjek brane [2].

4.2. Određivanje kote krune brane

Nadvišenje krune brane iznad najviše razine vode u jezeru je vrlo značajan čimbenik njezina osiguranja od opasnosti prelijevanja vode i rušenja. Više okolnosti može uzrokovati da najviša razina vode u jezeru bude povremeno iznad projektirane, a prikazane su na slici 5.



Slika 5. Elementi za proračun kote krune brane [2].

Radi osiguranja brane potrebno je pretpostaviti da sve spomenute pojave djeluju istodobno i da njihov zbroj diže razinu jezera iznad normalne projektom određene kote vode. Projektna kota krune je zadana slijedećim izrazom (1).

$$H_K = H_R + h_m + h_{pv} + h_d + h_s + S = H_R + \Delta H \quad (1)$$

Gdje je:

H_K – kota krune brane;

H_R – najviša radna razina vode, [788.8 mn.m.];

h_m – debljina mlaza iznad praga preljeva;

h_{pv} – visina penjanja valova uz kosinu pri djelovanju najjačeg vjetra u najnepovoljnijem smjeru;

h_d – porast razine jezera uz branu zbog pojave plime u smjeru potiskivanja vode vjetrom, za promatrani slučaj neznatno i može se uključiti u sigurnosni dodatak;

h_s – porast razine vode uz branu zbog pojave polaganih oscilacija jezera-seiše, na manjim jezerima su česte vrijednosti od 15 cm, te budući da nema pouzdane metode računanja se uvrštavaju u sigurnosni dodatak;

S – sigurnosno nadvišenje;

Visina značajnog vala dobivena je korištenjem podataka sa meteorološke postaje Parg [4]. Proračunom svih potrebnih elementa dobiveno je nadvišenje od 3.24 m, pa je samim time kota krune brane na 792.8 mn.m.

4.3. Određivanje filterskih slojeva

Unutrašnja erozija, misleći pritom na sufoziju je proces u kojem struja vode zahvaća ili otkida i prenosi čestice tla kroz pore. One se mogu ponovno taložiti na mjestima gdje se brzina smanjuje (u širokim porama), ili gdje su pore uže od čestica. Ta pojava je ponekad opasna u prirodnome nehomogenom tlu. Na mjestu odnošenja tlo se razrahljuje, što pod opterećenjem izaziva dodatne deformacije, a ako proces traje dovoljno dugo, mogu nastati i urušavanja. Unutar brane, erozija može početi na granicama između materijala sitnijeg i krupnijeg zrna [5]. Iz navedenih razloga je potrebno na svim granicama između materijala različite granulacije ugraditi filtarske prijelazne slojeve. Granulacija filtarskog sloja mora garantirati stabilnost od unutrašnje erozije samog filtra, odnosno raspon promjera zrna ne smije biti prevelik. Da bi se zaštitilo od erozije sitnozrnatostog na granici s krupnozrnatstvom materijalom, valja ugraditi filter od nekoliko slojeva kod kojih je granulacija uzastopno krupnija [5].

Filtarski slojevi moraju zadovoljavati slijedeće uvjete:

- Propusnost filtera treba biti znatno veća od propusnosti materijala iz kojeg voda dotječe;
- Granulacija filtarskih slojeva mora biti takva da spriječe dalje prenošenje sitnih čestica kroz filter;
- Granulacija filtra ne smije dozvoliti unutrašnju eroziju filtra;
- Granulacija mora biti takva da se materijal ne segregira pri ugrađivanju [6].

Za promatrani slučaj odabire se troslojni filtarski sloj sa slojevima srednjezrnatog pijeska, krupnozrnatog pijeska i šljunka. Filtarski sloj se postavlja sa uzvodne i nizvodne strane u debljini od 2.1 m na vrhu i 4.5 m pri dnu slojeva. Granulometrijske krivulje su proračunate pomoću dvije predložene formule za zadano maksimalno zrno materijala. Prema švicarskom institutu za ispitivanje materijala i konstrukcija EMPA (njemački: *Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt*) (2) i prema Fulleru (3) [7].

$$\text{EMPA:} \quad A = 50 \left(\frac{d}{d_m} + \sqrt{\frac{d}{d_m}} \right) \quad (2)$$

gdje je:

A – prolaz na situ [%];

d_m – maksimalna veličina zrna [mm];

d – otvor sita [mm].

$$\text{Fuller:} \quad B = 100 \sqrt{\frac{d}{d_m}} \quad (3)$$

gdje je:

B – prolaz na situ [%];

d_m – maksimalna veličina zrna [mm];

d – otvor sita [mm].

Odabrane su slijedeće vrijednosti maksimalnih zrna:

- Glinena jezgra $d_m = 0.06$ mm;
- filtarski sloj – srednjezrnati pijesak $d_m = 0.8$ mm;
- filtarski sloj – krupnozrnati pijesak $d_m = 5$ mm;
- filtarski sloj – šljunak $d_m = 45$ mm.

Potrebno je da definirani filtarski slojevi zadovoljavaju filtarsko pravilo definirano prema standardu HRN U.C5.020. 1980 [8], gdje prvo filtarsko pravilo (4) onemogućava začepljenje filtra, a drugo filtarsko pravilo (5) onemogućava ispiranje.

$$D_{15}^F : D_{15}^O \quad (4)$$

$$D_{15}^F : D_{85}^O \quad (5)$$

gdje je:

O – bazni materijal, tlo, jezgra, prethodni filtarski sloj;

F – filtarski materijal;

15 – prolaz na situ od 15 %;

85 – prolaz na situ od 85 %;

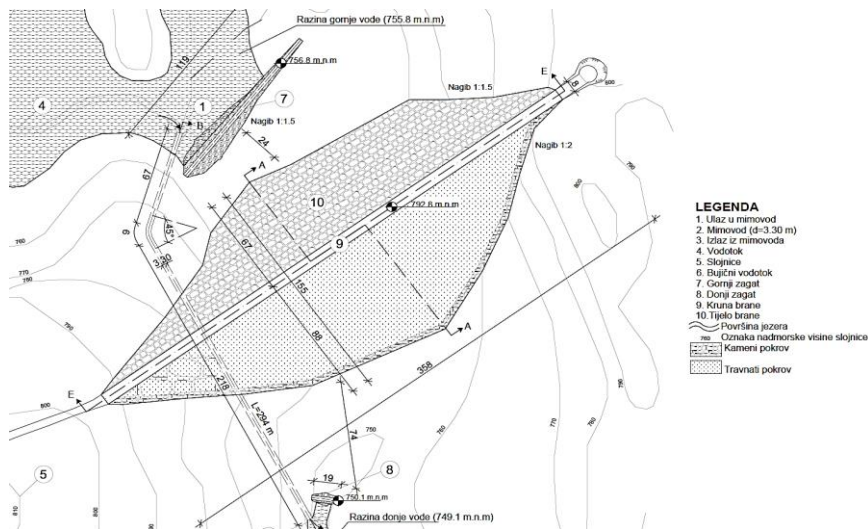
D – veličina zrna [mm].

Provedenom provjerom svi filtarski slojevi zadovoljavaju.

4.4. Evakuacija vode za vrijeme gradnje

Za gradnju brane i akumulacije Križ potok potrebno je prethodno izvesti evakuaciju vode za vrijeme građenja. Protok koji je potrebno evakuirati prema *Ožanić i dr.*, iznosi $31.7 \text{ m}^3/\text{s}$ [9], što odgovara protoku povratnog perioda od 100 godina. U pravilu se kod evakuacije vode uzima protok povratnog perioda od 20 godina [6], no zbog sigurnosti i malih razlika u protocima u ovom slučaju uzet je protok povratnog perioda od 100 godina. Evakuacija vode će se vršiti pomoću odvodnog tunela koji će vodu iz vodotoka preusmjeriti nizvodno od gradilišta. Za spomenuti način

evakuacije vode iz vodotoka potrebna je izvedba donjeg i gornjeg nasutog zagata koji pregrađuju vodotok te preusmjeravanje vode u obilazni odvodni tunel (Slika 6).



Slika 6. Princip evakuacije velikih voda za vrijeme gradnje brane [2].

Proračunom evakuacije vode za vrijeme gradnje dobivene su sljedeće vrijednosti:

- Visina donjeg zagata: 1.90 m;
- Visina gornjeg zagata: 6.0 m;
- Promjer tunela: 3.3 m.

4.5. Proračun preljeva

Nasute brane su nepreljevne što znači da se koriste preljevi na boku doline i slobodnostojeći preljevi. Prelijevanje preko nasute brane, pogotovo ukoliko je ono dugotrajno, može uzrokovati eroziju nizvodnog pokosa što može rezultirati rušenjem brane [6].

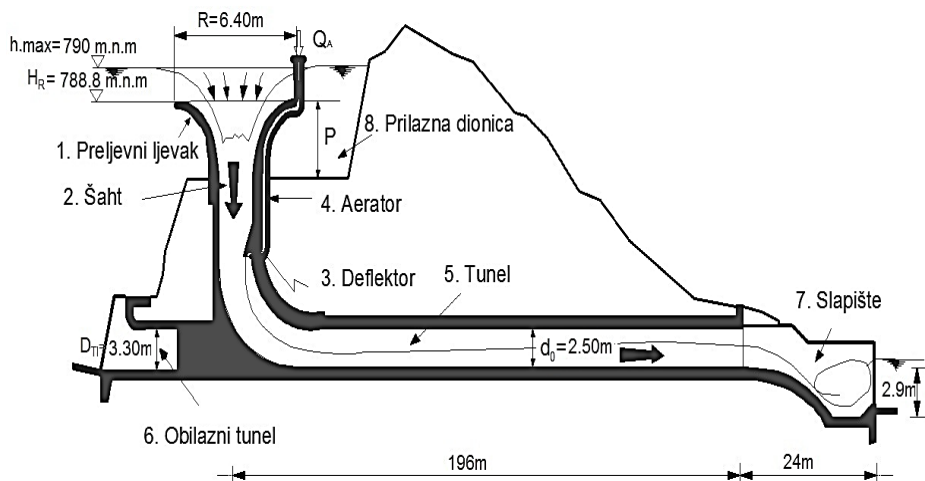
Preljevi se dimenzioniraju na maksimalni protok koji odgovara povratnom periodu od 1,000 godina, a ako su ugroženi životi na povratni period od 10,000 godina. Budući da bi u slučaju rušenja brane Križ potok izravno bilo ugroženo više od 1,000 ljudskih života, kao mjerodavan protok za proračun preljeva se uzima protok povratnog perioda od 10,000 godina koji je za zadano područje prema *Ožanić i dr.* jednak $53.1 \text{ m}^3/\text{s}$ [9]. Budući da je na lokaciji predviđena izvedba tunela za evakuaciju vode za vrijeme

građenja brane, odlučeno je da će se izvoditi bunarski preljev koji će se spojiti na već postojeći tunel.

Bunarski preljev (Slika 7) je evakuacijski organ sa ljevkastim preljevom koji se nastavlja provodnikom u vidu vertikalnog šahta i tunela blago produženog pada, a završava u umirujućem bazenu. Ljevkastí preljev omogućava hidraulički i konstruktivni dobar prijelaz prema vertikalnom šahtu [6].

Proračunom su dobivene sljedeće dimenzije bunarskog preljeva:

- Vanjski promjer lijevka: 6.4 m;
- Visina prelijevanja: 1.2 m;
- Promjer cijevi tunela: 2.5 m.



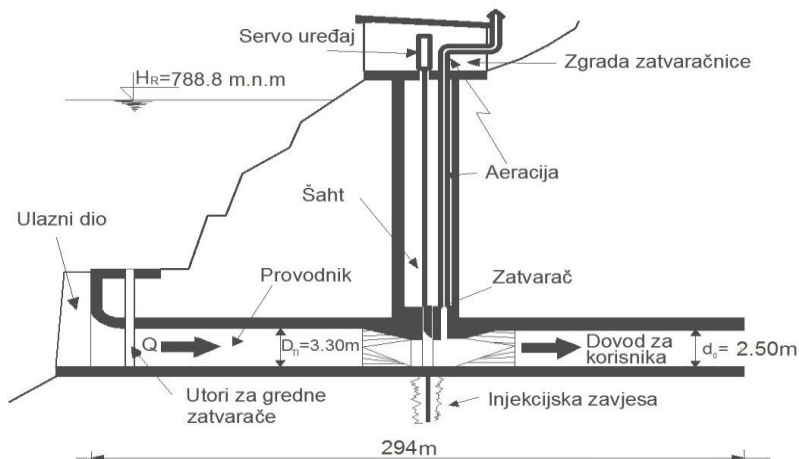
Slika 7. Bunarski preljev [2].

4.6. Proračun temeljnog ispusta

Temeljni ispust mora biti postavljen ispod minimalne radne razine vode u akumulaciji te služi za pražnjenje akumulacije radi pregleda i popravaka, za evakuaciju vode za vrijeme velikih voda te za pražnjenje nanosa koji se istaložio. Sastoji se od ulazne građevine, provodnika, kontrolnog dijela za regulaciju sa zatvaračnicom, izlaznog dijela i slapišta. Ako se za vrijeme gradnje evakuacija vode provodi obilaznim tunelom, tada se on nakon završetka brane može adaptirati u temeljni ispust, odvod bunarskog preljeva ili dovod na hidroelektranu [6].

Kod promatranog slučaja predložena je prenamjena obilaznog tunela za temeljni ispust i provodnik bunarskog preljeva sa suženjem na zatvaračnici

temeljnog ispusta (Slika 8). Proračunom temeljnog ispusta određeno je da njegov promjer iznosi 2.5 m.



Slika 8. Temeljni ispust i zatvaračnica [2].

4.7. Dimenzioniranje aeratora

Kod projektiranja zatvaračnica izuzetno je značajno osigurati dobro ozračivanje zatvarača s nizvodne strane. Ozračivanje kod brzog spuštanja zatvarača i pražnjenja tlačnog cjevovoda služi za evakuaciju zraka, jer zračni „jastuci“ ako ostanu zarobljeni, mogu izazvati poteškoće u pogonu, pa čak i havariju, a ujedno služe i za sprječavanje pojave kavitacije.

Proračunom je određena dimenzija aeracijske cijevi kvadratičnog poprečnog presjeka duljine stranice od 1 m (Slika 8). Proračunom je utvrđeno da za odabrane dimenzije poprečnog presjeka omogućuju brzinu zraka u aeracijskoj cijevi od 45.07 m/s (brzina mora biti manja od 50 m/s) [6].

5. Zaključak

Odabranim pregradnim profilom postignut je optimalan odnos između veličine brane, karakteristika akumulacije te utjecaja na okoliš i okolno stanovništvo koje se zbog namjene akumulacije za vodoopskrbu nalazi pod posebnom kontrolom zaštita voda.

Analizom hidroloških i geoloških podloga područja, za izgradnju je odabrana kamena nasuta brana sa kosom glinenom jezgrom visine 42 m. Kao ispuna same brane odabrani su klastiti (pješčenjaci) i šejl sa nizvodne

strane brane, a dolomit koji će se dovoziti iz kamenoloma za zaštitu uzvodne strane brane. Radi zaštite unutrašnjih slojeva nizvodne strane brane je odabrano nasipavanje nizvodne kosine sa zemljom i zatravnjenje iste radi zaštite pokosa i estetskog uklapanja brane u okoliš.

Predviđena je evakuacija vode na protok povratnog perioda od 100 godina koji iznosi $31.7 \text{ m}^3/\text{s}$ obilaznim tunelom dužine 294 m koji se kasnije prenamjenjuje u cijev temeljnog ispusta i bunarskog preljeva. Preljev je dimenzioniran na protok povratnog perioda od 10,000 godina koji iznosi $53.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Preljev i temeljni ispust imaju zajedničko produbljeno slapište od 2.9 m, te širine 7 m i dužine 24 m. Predviđeno vrijeme pražnjenja akumulacije iznosi 4.96 dana. U blizini brane predviđena je izvedba zahvata vode, koji vodi zahvaćenu vodu iz akumulacije do uređaja za kondicioniranje. Uz branu se predviđa i izvedba objekata za održavanje i funkcioniranje brane.

Prednosti rješenja predloženim ovim radom su sljedeće:

- Nema potreba za iseljavanjem stanovništva koje više ne bi bilo smješteno na prijevoju između akumulacija.
- Jednaka mogućnost iskorištavanja lokalnih materijala za gradnju brane.
- Veća mogućnost iskorištavanja voda iz buduće akumulacije u hidroenergetskom sustavu, odnosno većem opsegu vodoopskrbe.

Literatura

- [1] Akumulacija Križ potok – I. faza, Tender dokumentacija, Hrvatske vode i Hidro inženjering, 2014.
- [2] Vincek, D., *Idejno rješenje nasute brane Križ potok*, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2015.
- [3] Savić, D., Dozet, S., *Osnovna geološka karta, Delnice, SGZ*, 1985.
- [4] DHMZ, *Meteorološki podaci za postaju Parg*.
- [5] Nonveiller, E., *Nasute brane-projektiranje i građenje*, Školska knjiga, Zagreb, 1983.
- [6] Savić, Lj. M., *Uvod u hidrotehničke građevine*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2003.
- [7] Ukrainczyk, V., *Beton: struktura, svojstvo, tehnologija*, ALCOR Zagreb, Zagreb, 1994.
- [8] Standard HRN U.C5.020. 1980: *Projektiranje nasutih brana i hidrotehničkih nasipa: Tehnički uvjeti*, 1980.
- [9] Ožanić, N., Rubinić, J., Kukuljan, I., *Studija mogućnosti korištena voda potoka Križ za vodoopskrbu*, Hrvatska vodoprivreda, Rijeka, 1994.

MODELIRANJE UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA S AKTIVNIM MULJEM UPOTREBOM ASM1 MODELA

MODELLING WASTEWATER TREATMENT PLANT WITH ACTIVE SLUDGE BY USING ASM1 MODEL

Goran Volf*, Nataša Atanasova**

Sažetak

Obrada otpadnih voda aktivnim muljem je najzastupljeniji način obrade u svijetu, a ujedno predstavlja izrazito složen fizikalni, kemijski i biološki proces. Kako bi se doprinijelo optimiziranju procesa, uređaje za pročišćavanje otpadnih voda s aktivnim muljem (UZPOV-e) je potrebno modelirati. UZPOV-i s aktivnim muljem predstavljaju uređaje drugog stupnja pročišćavanja sa ili bez recirkulacije aktivnog mulja te služe za uklanjanje organske tvari iz otpadne vode. Trenutno najzastupljeniji modeli za modeliranje UZPOV-a su konceptualni modeli s aktivnim muljem-ASM (engl. Activated Sludge Models) koji se temelje na osnovnim fizikalnim, kemijskim i biološkim principima.

U ovome radu je prikazano modeliranje UZPOV-a s aktivnim muljem upotrebom proširenog ASM1 modela. Upotrebom modela modelirane su koncentracije brzo i sporo biorazgradive kemijske potrošnje kisika (KPK) te koncentracije aktivne i pasivne heterotrofne biomase. Jednostavnom verifikacijom modela potvrđeno je da model ispravno funkcionira.

Ključne riječi: obrada otpadnih voda aktivnim muljem, model ASM1, modeliranje

Abstract

Wastewater treatment with activated sludge is currently the most common method of treatment in the world which also represents an extremely complex physical, chemical and biological process. In order to contribute to optimizing processes on wastewater treatment plants (WWTPs) with activated sludge the plants need to be

* Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: goran.volf@gradri.uniri.hr

** Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

E-mail: natanaso@gmail.com

modelled. WWTPs with activated sludge present the second (biological) stage of wastewater treatment with or without recirculation of activated sludge and are used to remove organic matter from wastewater. Currently, the most common models for modelling WWTPs are conceptual models with activated sludge-ASM which are based on the basic physical, chemical and biological principles.

This paper presents modelling of WWTP with activated sludge using the expanded ASM1 model. Using the model, concentrations of readily and slowly biodegradable chemical oxygen demand (COD) and concentrations of active and passive heterotrophic biomass are modelled. With simple model verification it is confirmed that the model works properly.

Key words: *wastewater treatment with active sludge, model ASM1, modelling*

1. Uvod

U današnje vrijeme biološka obrada otpadne vode aktivnim muljem je najzastupljeniji način obrade zbog svojih mogućnosti, ekonomičnosti i efikasnosti. Dvije glavne komponente ovog procesa čine aeracijski bazen te sekundarni, odnosno naknadni taložnik [1].

Matematičko modeliranje je koristan alat kojim se može dobiti povratna informacija o radu uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UZPOV) na temelju koje se može optimizirati dizajn i rad UZPOV-a, kako bi se u postojećim uvjetima postigla najbolja moguća kakvoća pročišćene otpadne vode (efluenta) [2].

Za matematičko modeliranje mogu se izdvojiti takozvani modeli aktivnog mulja (ASM; *engl. Activated Sludge Models*), koji se već više od dva i pol desetljeća koriste za dobivanje uvida u učinkovitost UZPOV-a, procjenu mogućih scenarija za nadogradnju te procjenu novodizajniranih uređaja. Strategija ASM modela je definirana na sljedećim principima: 1) Simulacija rada uređaja, 2) Kalibracija modela na temelju izmjerenih podataka, 3) Simulacija serije testova korištenjem svojstava mulja kako je predviđeno u 1), 4) Simulacija rada uređaja pomoću povratne informacije iz serije testova te 5) Simulacija različitih alternativnih sustava. Modele je moguće kalibrirati na temelju pravilne karakterizacije otpadne vode i mulja te detaljne evaluacije postavljenog toka otpadne vode [2]. ASM modeli su zasnovani na uobičajenim masenim bilancama te jednadžbama koje opisuju brzinu rasta mikroorganizama, potrošnju supstrata (hranjiva) te formiranje proizvoda [3]. ASM modeli postoje u nekoliko oblika različite složenosti, to su ASM1, ASM2 te ASM3. Ovi modeli uključuju veliki broj mjernih veličina i bioloških procesa, a opisuju dvije najrelevantnije faze postupka s aktivnim muljem; biološku oksidaciju u aeracijskom bazenu te sekundarno taloženje

u taložniku [3]. Ovisno o stupnju obrade otpadnih voda (npr. uklanjanje spojeva ugljika, nitrifikacija ili denitrifikacija te uklanjanje fosfora) za modeliranje će se primijeniti jedna od tri varijante modela.

ASM1 model se smatra jednim od najboljih konceptualnih modela u kojima se uklanjaju spojevi ugljika te dušik [3]. Model je prilično složen te zahtijeva poznavanje 13 različitih masenih koncentracija-varijabli koje opisuju stanje sustava te 8 procesa [3]. Varijable i procesi korišteni u ovom radu prikazani su na Slici 2.

U ovome radu je prikazano modeliranje UZPOV-a s aktivnim muljem (uređaj drugog stupnja pročišćavanja otpadnih voda) upotrebom proširenog ASM1 modela koji u sebi sadrži proces adsorpcije [4], kojem je zadaća modelirati/predvidjeti koncentraciju brzo ($C_{KPK,X}$) i sporo ($C_{KPK,S}$) biorazgradive kemijske potrošnje kisika te koncentracije aktivne ($X_{B,H}$) i pasivne (X_{ads}) heterotrofne biomase na izlazu otpadne vode iz uređaja. Vrijednosti kemijske potrošnje kisika (KPK) na izlazu iz uređaja su najbolji pokazatelji kvalitete rada uređaja, odnosno zaostalog organskog opterećenja, čime se ukazuje i na uspješnost samog procesa pročišćavanja [1, 5, 6]. Iz toga razloga navedena varijabla definirana je kao promatrana izlazna veličina koja najbolje ukazuje na stanje procesa, odnosno varijabla čiju se dinamiku želi objasniti i predvidjeti modelom. Upotrebom modela omogućilo bi se predviđanje vrijednosti KPK te ukoliko ona bude veća od zakonom dopuštene, prema Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda [7], omogućilo bi se brzo reagiranje koje bi osiguralo njezino smanjenje na prihvatljivu razinu [6].

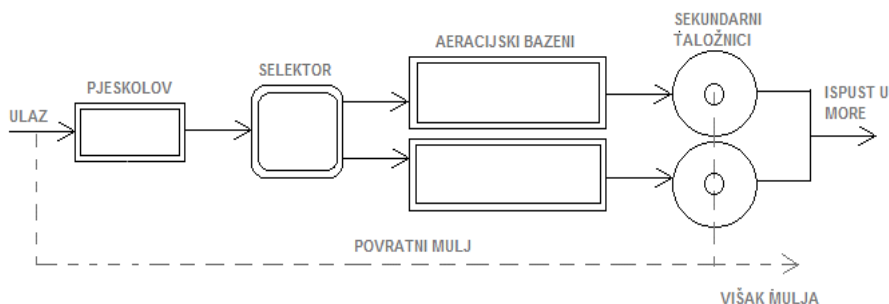
Kako je već spomenuto, model se koristio i za modeliranje koncentracije aktivne heterotrofne biomase ($X_{B,H}$) na izlazu otpadne vode iz uređaja. Poznato je da je aktivna heterotrofna biomasa bitna kod upravljanja prilikom uklanjanja KPK [8].

Rješavanje diferencijalnih jednadžbi koje opisuju ASM1 model provedeno je korištenjem programskog alata „Matlab“ [9].

2. Opis uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

Modelirani uređaj je uređaj drugog stupnja (biološkog) pročišćavanja otpadnih voda cirkulacijom aktivnog mulja čiji je 9,500 ekvivalent stanovnika (ES). Uređaj se sastoji od pet glavnih jedinica koje su prikazane na Slici 1; to su pjeskolov-mastolov, selektor, aeracijski bazeni, sekundarni taložnici te sustav za obradu mulja. Tok vode na uređaju je sljedeći: otpadna voda ulazi u pjeskolov-mastolov gdje se odvija mehanički tretman. Nakon toga voda se transportira u selektor gdje se odvija selekcija mikroorganizama (kontakt biomase sa otpadnom vodom). Voda se zatim

transportira u aeracijske bazene gdje se odvija biološki tretman otpadne vode sa mikroorganizmima. Na kraju se mješavina vode i aktivnog mulja šalje u sekundarni taložnik gdje se flokule mikroorganizama talože, a čista voda izlazi u recipijent kroz podmorski ispust. Istaloženi mulj se reciklira natrag u aeracijski bazen kako bi se održala dostatna koncentracija aktivnog mulja za uspješan tretman procesa u reaktoru.



Slika 1. Shema toka vode na UZPOV-u.

Analiza otpadne vode na uređaju obuhvaća standardne parametre kod analize otpadnih voda. Neki od parametara prikazani su u Tablici 1. Nizak omjer KPK/BPK₅* (~2.3) upućuje na veliku biorazgradivost organskih tvari za koju se primjenjuje biološki tretman otpadnih voda [1].

Tablica 1. Neki od analiziranih parametara na UZPOV-u.

Parametar	Protok ulaz [m ³ /dan]	Temperatura izlaz [°C]	BPK ₅ * ulaz [mg/l]	BPK ₅ izlaz [mg/l]	KPK ulaz [mg/l]	KPK izlaz [mg/l]
Srednja vrijednost	650	15	210	5	480	30

* Petodnevna biokemijska potrošnja kisika

3. Definiranje proširenog ASM1 modela

3.1. Definiranje jednadžbi kinetike procesa

Upotrebom kinetike procesa te stehiometrije proširenog ASM1 modela [2, 3, 4] izvedene su sljedeće jednadžbe kojima se opisuju:

- koncentracija brzo biorazgradivog KPK ($C_{KPK,S}$):

$$\frac{dC_{KPK,S}}{dt} = -\frac{\mu_H}{Y_H} \cdot \left(\frac{0,9 \cdot C_{KPK,S}}{K_S + 0,9 \cdot C_{KPK,S}} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) \cdot X_{B,H} - 0,1 \cdot k_{ads} \cdot C_{KPK,S} \cdot X_{B,H} + k_{h,Xads} \cdot X_{ads} + 0,2 \cdot k_{h,KPK,X} \cdot C_{KPK,X} \quad (1)$$

- koncentracija sporo biorazgradivog KPK ($C_{KPK,X}$):

$$\frac{dC_{KPK,X}}{dt} = b_H \cdot X_{B,H} - 0,2 \cdot k_{h,KPK,X} \cdot C_{KPK,X} - 0,8 \cdot k_{ads} \cdot C_{KPK,X} \cdot X_{B,H} \quad (2)$$

- pasivna heterotrofna biomasa (X_{ads}):

$$\frac{dX_{ads}}{dt} = 0,1 \cdot k_{ads} \cdot C_{KPK,S} \cdot X_{B,H} + 0,8 \cdot k_{ads} \cdot C_{KPK,X} \cdot X_{B,H} - k_{h,Xads} \cdot X_{ads} \quad (3)$$

- aktivna heterotrofna biomasa ($X_{B,H}$):

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = \mu_H \cdot \left(\frac{0,9 \cdot C_{KPK,S}}{K_S + 0,9 \cdot C_{KPK,S}} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) \cdot X_{B,H} - b_H X_{B,H} \quad (4)$$

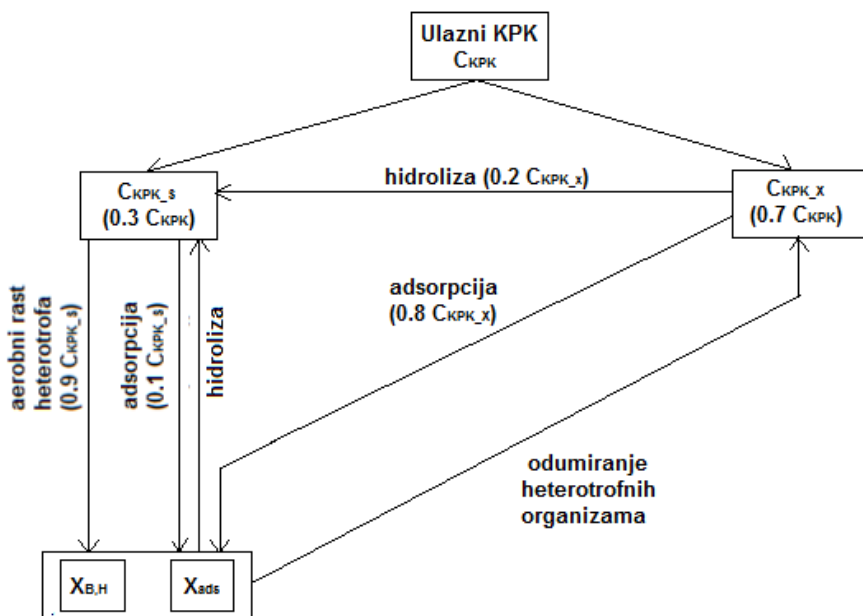
Opisi pojedinih parametara u jednadžbama (1)-(4) dani su u poglavlju 3.3, Tablica 2. Na Slici 2 prikazan je shematski prikaz kinetike procesa proširenog ASM1 modela gdje je prikazana veza između pojedinih parametara i procesa.

Biorazgradivi KPK na izlazu otpadne vode iz uređaja se u proširenom modelu dijeli na brzo i sporo biorazgradivi KPK. $C_{KPK,S}$ predstavlja brzo biorazgradivi KPK koji u sustavu čini 30% vrijednosti C_{KPK} , dok $C_{KPK,X}$ predstavlja sporo biorazgradivi KPK koji u sustavu čini 70% C_{KPK} . $C_{KPK,S}$ sastavljaju jednostavne molekule koje mogu lako proći kroz stanične membrane heterotrofnih mikroorganizama te se mogu odmah upotrijebiti u procesu metabolizma za vlastitu energiju te sintezu biomase. $C_{KPK,X}$ sastavljaju veće kompleksnije molekule koje su adsorbirane među aktivnim muljem te ih je potrebno rastaviti na manje molekule procesom hidrolize prije nego li mogu proći kroz staničnu membranu da bi se mogle upotrijebiti za metabolizam i sintezu biomase organizama [1].

Dio sporo biorazgradivog KPK ($0,2 C_{KPK,X}$) se procesom hidrolize razgrađuje na brzo biorazgradivi KPK, a preostali dio ($0,8 C_{KPK,X}$) se procesom adsorpcije adsorbira na biomasu heterotrofnih mikroorganizama. Heterotrofni mikroorganizmi su sastavljeni od aktivne ($X_{B,H}$) i pasivne (X_{ads}) biomase. Aktivna biomasa vrši proces aerobnog rasta, gdje se troši $C_{KPK,S}$ te se odvija odumiranje heterotrofnih mikroorganizama.

Odumiranje heterotrofnih mikroorganizama predstavlja proces kojim iz odumrle biomase nastaje sporo biorazgradivi KPK ($C_{KPK,X}$).

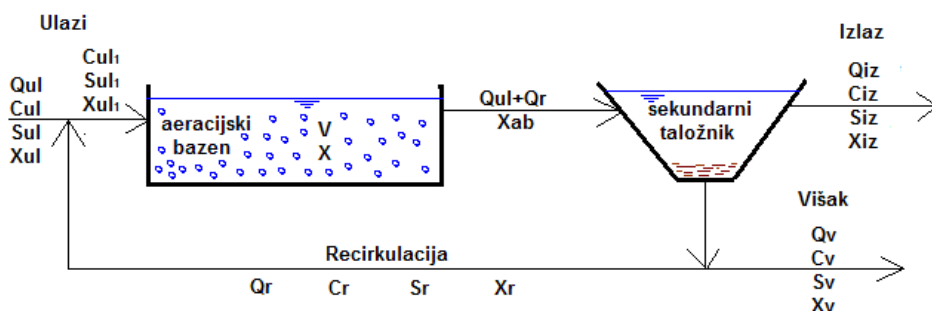
Kako za sporo biorazgradivi KPK ($C_{KPK,X}$), tako se i za brzo biorazgradivi KPK ($C_{KPK,S}$) pretpostavlja proces adsorpcije kojim se $0.1C_{KPK,S}$ adsorbira na biomasu heterotrofnih mikroorganizama, odnosno na njen pasivni dio (X_{ads}). Preostali dio $0.9C_{KPK,S}$ se upotrebljava za aerobni rast heterotrofnih mikroorganizama. Pasivna heterotrofna biomasa (X_{ads}) je kao i sporo biorazgradivi KPK podvrgnuta procesu hidrolize do brzo biorazgradivog KPK.



Slika 2. Shematski prikaz kinetike procesa proširenog ASM1 modela.

3.2. Definiranje masenih bilanci

Za UZPOV-e s aktivnim muljem mogu se postaviti razne masene bilance [1]. Shema modeliranog uređaja s aktivnim muljem prikazana je na Slici 3.



Slika 3. UZPOV s aktivnim muljem i cirkulacijom mulja [1].

Na Slici 3, Q predstavlja protok otpadne vode, C određenu koncentraciju (npr. KPK), S koncentraciju supstrata (hranjiva), X koncentraciju aktivnog mulja, dok je V volumen aeracijskog bazena.

Bilanca otpadne vode za uređaj sa Slike 3 glasi:

$$Q_{ul} = Q_{iz} + Q_v \quad (5)$$

dok, ukupna masena bilanca za uređaj glasi:

$$Q_{ul} * C_{ul} - r_{v,s} * V = Q_{iz} * C_{iz} + Q_v * C_v \quad (6)$$

Izraz $r_{v,s} * V$ u jednadžbi (6) može biti napisan i na način da volumen aeracijskog bazena V , kao i koncentracija aktivnog mulja X budu uključeni odvojeno na sljedeći način; $r_{x,s} * V * X$, gdje su $r_{v,s}$ i $r_{x,s}$ brzine reakcije [1].

Masene bilance se koriste za tri bitne namjene; 1) za proračun volumena aeracijskog bazena, 2) predikciju/analizu raznih koncentracija u efluentu, te 3) za određivanje kinetike odnosno brzine reakcije procesa [1]. U ovom radu postavljanjem masenih bilanci određene su koncentracije sporo i brzo biorazgradivog KPK, te koncentracije aktivne i pasivne heterotrofne biomase.

Prema Slici 3, upisivanjem odgovarajućih ulaza i izlaza za aeracijski bazen u jednadžbe (1)-(4), dobivene su jednadžbe masenih bilanci za modelirane procese koje su zatim rješavane upotrebom programskog alata „Matlab“ [9].

3.3. Definiranje ulaznih veličina i parametara modela

U Tablici 2 dane su vrijednosti parametara i varijabli koji su korišteni u proširenom ASM1 modelu. U tablici je dan simbol, opis, mjerna jedinica, početna vrijednost parametra te pretpostavljen raspon vrijednosti parametara prema literaturi [1, 2, 3].

Tablica 2. Vrijednosti parametara i varijabli korištenih prilikom modeliranja

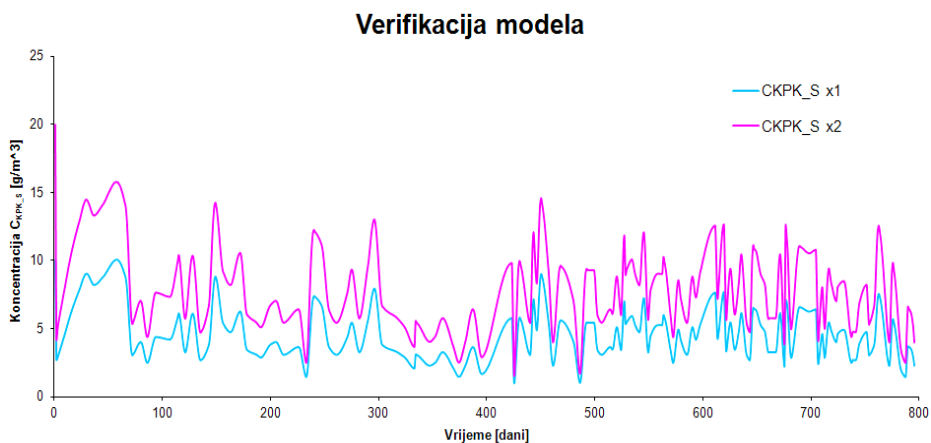
Simbol	Opis	Mjerna jedinica	Preuzeta/početna vrijednost	Raspon u literaturi [1, 2 3]
Stehiometrijski parametri				
Y_H	koeficijent prirasta heterotrofa	gKPK/ gKPK	0,5	0,38-0,75
Kinetički parametri				
$k_{h\text{ KPK } X}$	maksimalna brzina hidrolize komponente $C_{\text{KPK } X}$	/dan	3	1 - 5
$k_{h\text{ Xads}}$	maksimalna brzina hidrolize komponente X_{ads}	/dan	3	1 - 5
k_{ads}	maksimalna brzina adsorpcije	/dan	0,03	0,01 - 0,05
μ_H	koeficijent rasta heterotrofa	/dan	10	0,6 - 13,2
K_S	saturacijski koeficijent za supstrat	gKPK/m ³	140	5 - 225
K_{OH}	saturacijski koeficijent za kisik	gO ₂ /m ³	0,2	0,01 - 0,2
b_H	brzina odumiranja heterotrofa	/dan	0,3	0,05 - 1,6
Protoci				
Q_{ul}	srednji godišnji protok	m ³ /dan	650	
Q_r	srednji godišnji protok kod recirkulacije	m ³ /dan	400	
Volumen aeracijskog bazena (AB)				
V	Volumen	m ³	1200	
Kisik				
S_o	Koncentracija kisika u AB	g/m ³	2	

Definiranjem jednadžbi kinetike procesa i masenih bilanci te početnih vrijednosti parametara i varijabli napravljena je simulacija modela u programskom alatu „Matlab“ [9] kojim se predviđaju koncentracije brzo ($C_{\text{KPK } X}$) i sporo ($C_{\text{KPK } S}$) biorazgradivog KPK te koncentracije aktivne ($X_{B,H}$) i pasivne (X_{ads}) heterotrofne biomase na izlazu otpadne vode iz uređaja.

Prilikom simulacije za ulazne vrijednosti brzo biorazgradivog KPK ($C_{KPK,S}$) korištene su mjerene vrijednosti BPK_5 na ulazu otpadne vode u uređaj [1]. Simulacijom modela pokušalo se dobiti takve vrijednosti brzo biorazgradivog KPK ($C_{KPK,S}$) koje se najbolje poklapaju sa mjerenim vrijednostima BPK_5 na izlazu otpadne vode iz uređaja.

4. Rezultati i diskusija

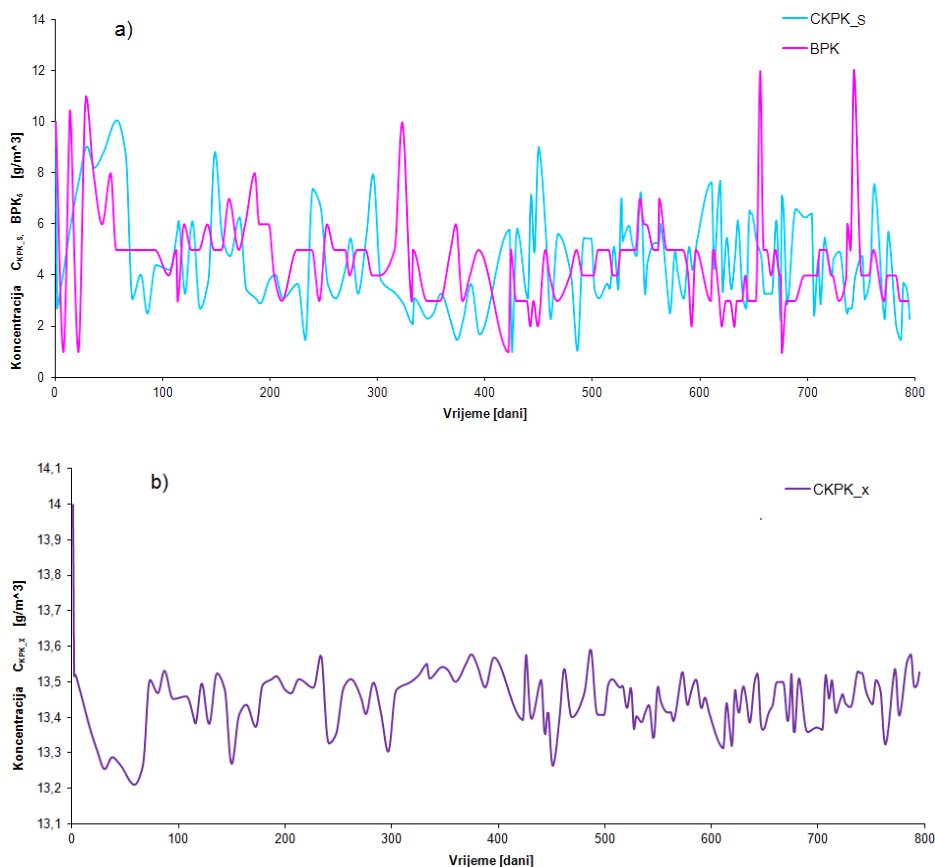
Prije simulacije modela napravljena je jednostavna verifikacija modela (Slika 4) kojom se identificiraju nepravilnosti djelovanja proširenog ASM1 modela. Prilikom verifikacije modela identificira se odaziva li se model logično na promjenu ulaza ili parametara modela. Za verifikaciju modela pretpostavljeno je da se vrijednosti brzo biorazgradive organske tvari na ulazu u uređaj povećaju za 2 puta ($C_{KPK,S}=2C_{KPK,S}$). Prilikom verifikacije uzeto je u obzir da se koncentracija mikroorganizama u aeracijskom bazenu neće promijeniti, a pretpostavka je da će se jedino simulirana vrijednost komponente $C_{KPK,S}$ povećati 2 puta.



Slika 4. Jednostavna verifikacija modela.

Sa Slike 4 vidimo da se prošireni ASM1 model ponaša u skladu sa očekivanjima te se može iz toga zaključiti da ASM1 model djeluje ispravno.

Analiza osjetljivosti te kalibracija parametara nisu napravljeni već su se vrijednosti pojedinih parametara uzele u dopuštenim granicama prema literaturi [1, 2, 3; Tablica 2] te zbog toga dobiveni model nije najbolji model ali se dosta dobro prilagođava mjerenim vrijednostima, što se može vidjeti na Slici 5a.



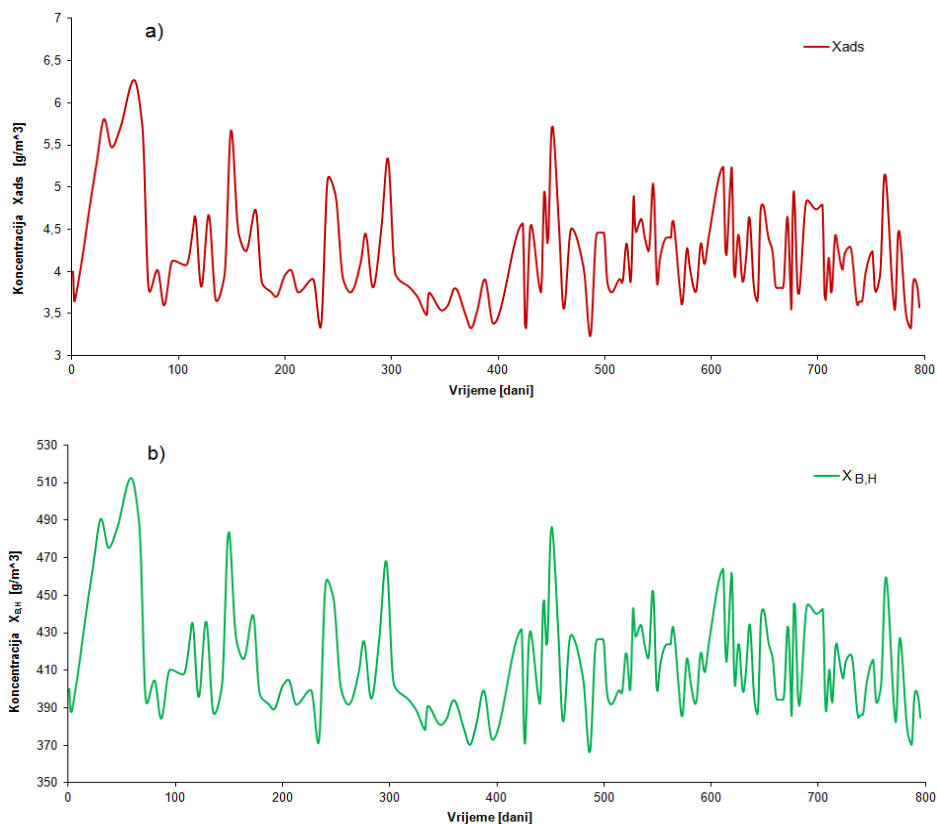
Slika 5. a) Brzo biorazgradivi KPK ($C_{KPK,S}$) te usporedba sa BPK_5 ; b) sporo biorazgradivi KPK ($C_{KPK,X}$).

Rezultati provedene simulacije modela prikazani su na Slikama 5 i 6. Na Slici 5a prikazana je simulacija brzo biorazgradivog KPK ($C_{KPK,S}$) te usporedba s mjerenim vrijednostima BPK_5 na izlazu iz uređaja, dok je na Slici 5b je prikazana simulacija sporo biorazgradivog KPK ($C_{KPK,X}$).

Koeficijent regresije za izrađeni model na Slici 5a iznosi $R^2=0.33$ te kao takav ne predstavlja značajnu vezu između mjerenih i simuliranih vrijednosti. Ipak, sa Slike 5a se vizualnom provjerom može vidjeti da su (pikovi) dosta dobro pogodeni, no ne dostižu vršne vrijednosti.

Na Slici 6a prikazana je simulacija pasivne heterotrofne biomase (X_{ads}), dok je na Slici 6b prikazana simulacija aktivne heterotrofne biomase (X_{BH}).

Simulirane vrijednosti koncentracija kreću se u određenim granicama vrijednosti koje su dane u literaturi za uređaje drugog stupnja pročišćavanja s recirkulacijom aktivnog mulja. [1, 2].



Slika 6. a) Pasivna heterotrofna biomasa (X_{ads}); b) aktivna heterotrofna biomasa ($X_{B,H}$).

5. Zaključak

UZPOV-i s aktivnim muljem su kompleksni i dinamični sustavi čije upravljanje i dimenzioniranje možemo poboljšati upotrebom raznih tehnika modeliranja [2, 3].

Prilikom modeliranja potrebno je dobro poznavati sustav (uređaj) koji se modelira kako bi se mogli odabrati svi relevantni procesi koji se žele opisati modelom.

U ovom radu korišten je najjednostavniji, no ipak komplicirani prošireni ASM1 model kojem je zadaća bila simulirati brzo i sporo biorazgradivi KPK ($C_{KPK,S}$, $C_{KPK,X}$) te aktivnu i pasivnu heterotrofnu biomasu ($X_{B,H}$, X_{ads}) na izlazu otpadne vode iz uređaja. Usporedbom mjerenih vrijednosti te vrijednosti koje su dobivene simulacijom modela dobiven je mali koeficijent regresije

te je u model potrebno ugraditi dodatne varijable i procese kako bi se poboljšala točnost modela.

U daljnjem radu predviđeno je u model uvrstiti dodatne procese te napraviti analizu osjetljivosti i kalibraciju pojedinih parametara u modelu kako bi se mogao dobiti što bolji model, tj. model koji se najbolje prilagođava mjerenim vrijednostima. Također, za daljnji rad predviđa se napraviti i simulacija rada uređaja upotrebom alata strojnog učenja.

Literatura

- [1] Henze, M., Herremoes, P., Jansen, J.C., Arvin E., *Wastewater Treatment-Biological and Chemical Processes*, Third edition, Springer, New York, US, 2002.
- [2] IWA Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing, London, UK, 2000.
- [3] Henze, M., Gujer, W., Mino, T., van Loosdrecht M., *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d AND ASM3*, IWA Publishing, London, UK, 2001.
- [4] Huang, J.C., Li, L., An innovative approach to maximize primary treatment performance, *Water science and technology*, 42: 209-222, 2000.
- [5] Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., *Wastewater Engineering-Treatment and Reuse*, Fourth edition, McGraw-Hill, 2003.
- [6] Čurlin, M., Bevetek, A., Ležajić, Z., Deverić-Meštović, B., Kurtanjek, Ž., Modeliranje procesa biološke obrade otpadne vode na komunalnom uređaju grada Velika Gorica, *Kemija u industriji*, 57 (2): 59-67, 2008.
- [7] *Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda*, Narodne novine br. 153/09, 63/11, 130/11 i 56/13, 2013.
- [8] Majewsky, M., Galle, T., Yargeau, V., Fischer, K., Active heterotrophic biomass and sludge retention time (SRT) as determining factors for biodegradation kinetics of pharmaceuticals in activated sludge, *Bioresources and technology*, 102 (16): 7415-7421, 2011.
- [9] *MATLAB 8.0 and Statistics Toolbox 8.1*, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, US, 2008.

ODREĐIVANJE LOKALNIH KOEFICIJENATA GUBITAKA U CIJEVNIM SUSTAVIMA POD TLAKOM

DEFINING THE COEFFICIENTS OF LOCAL LOSSES IN PIPE SYSTEMS UNDER PRESSURE

Maroje Obuljen*, Elvis Žic*, Nevenka Ožanić*

Sažetak

U ovom radu opisano je određivanje i analiza koeficijenata lokalnih gubitaka na fazonskim komadima u cijevnim sustavima pod tlakom. Koeficijenti lokalnih gubitaka potrebni su za izračunavanje lokalnih gubitaka energije pri strujanju realne (viskozne) tekućine kroz cijevi. Lokalni gubici su posljedica turbulencije u osnovnom toku (slobodna turbulencija) izazvane promjenom strujne slike (često uslijed promjene geometrije cijevi ili račvanja cijevi), dok je granični sloj dominantan kod formiranja linijskih gubitaka. Danas se u praksi za proračun lokalnih koeficijenata gubitaka često uzimaju gotove vrijednosti koeficijenata lokalnih gubitaka preuzete iz starih publikacija ili se koriste koeficijenti lokalnih gubitaka za „slične“ predgotovljene fazonske komade, što često u praksi dovodi do značajnih razlika u samom određivanju vrijednosti radnih tlakova na pojedinim mjernim točkama u mrežnom sustavu. U radu je dan prikaz i način izračuna koeficijenta lokalnog gubitka energije za dva slučaja nagle promjene protočnog presjeka (naglog proširenja i naglog suženja), kao i prikaz promjena energetske bilanse uzduž cijevnog sustava. Dodatno je provedena analiza koeficijenata lokalnog gubitka na pojedinim karakterističnim fazonskim komadima cijevnog sustava.

Ključne riječi: *granični sloj, koeficijent lokalnog gubitka, lokalni koeficijent gubitaka, vodoopskrbni sustav, sustav pod tlakom, energetska linija*

Abstract

The paper presents the determination and analysis the coefficients of local losses on fittings in piping systems under pressure. The coefficients of local losses are required to calculate the minor head losses of real (viscous) fluid through a pipe. The minor

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: omerajo@hotmail.com ; {elvis.zic, nevenka.ozanic}@uniri.hr

head losses are a result of turbulence in the primary (basic) flow (the so-called free turbulence) caused by a change of velocity of flow field (often due to changes in the geometry of the pipe or branching pipe), while the boundary layer was dominant to the formation the major head losses. Today, the practice of calculating minor head losses often takes finished values of the coefficient of local losses taken from old publications or used coefficients of local losses for "similar" prefabricated fittings, which in practice often leads to significant differences in the determination of the value of working pressures at individual measuring points in the network. The paper gives a display and the method of calculating the coefficient of local energy loss for sudden changes in the flow cross-section (sudden enlargement and sudden contraction) is given, as well as a display of changes of energy balances along the pipe system. Additional analysis was carried out of the coefficients of local losses on characteristic pipe system fittings.

Key words: boundary layer, the coefficient of local losses, the minor head losses, water supply system, system under pressure, energy line

1. Uvodno

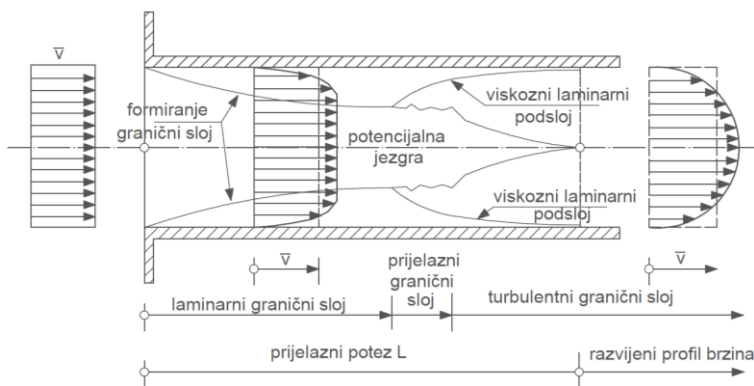
Tečenje fluida kroz cijevi pod tlakom je danas vjerojatno najvažnija primjena u mehanici fluida (vodoopskrba, naftovod, plinovod, toplovod, ventilacija, klimatizacija i sl.). Vektor brzine kod nestacionarnog i turbulentnog tečenja u bilo kojoj točki kapljevine u kretanju ima komponente u sva tri koordinatna pravca te se svaka od ove tri komponente mijenja i prostorno i vremenski u svakom trenutku [1]. To dovodi do značajnih promjena strujne slike unutar cijevnog sustava [2, 3]. Ukoliko je raspored brzina takav da strujnice pojedinog elementa koji se giba u tekućini ne mijenjaju orijentaciju za vrijeme tečenja, govori se o nevtložnom tečenju fluida [4, 5, 6]. Ukoliko se vektor brzine tijekom vremena ne mijenja u nekoj fiksnoj točki pokretnog fluida (ni po veličini ni po pravcu) takvo tečenje se naziva stacionarno. Newtonski fluid ($\tau = \mu \partial v / \partial y$; $\mu = \text{const.}$) se kreće kroz cijev u laminarnom ili turbulentnom kretanju. Pritom kod laminarnog kretanja u kružnoj cijevi pod tlakom nema miješanja između susjednih cilindričnih slojeva (tzv. lamina) te se djelići tekućine kreću linearnim putanjama [7]. Pri prijelazu kritičnog Reynoldsovog broja ($Re_{kr.}$) laminarno kretanje postaje nestabilno te postepeno prelazi u turbulentno kod prisutnosti dovoljno velike turbulencije toka [4, 8].

2. Princip formiranja lokalnih koeficijenata gubitaka

Hidraulički gubici energije u viskoznoj tekućini posljedica su savladavanja hidrodinamičkih otpora, odnosno otpora strujanju koji se kod strujanja u cijevima sastoje od otpora površine i otpora oblika [2, 6]. Pritom, otpori oblika mogu biti suštinski povezani sa formiranjem lokalnih

koeficijenata gubitaka, dok su otpori površine (otpori trenja) posljedica razvoja graničnog sloja neposredno uz čvrstu podlogu uz koju struji tekućina te formiraju linijske gubitke [4, 6].

Strujanje viskozne tekućine u blizini čvrste stjenke karakterizira formiranje zone toka u kojoj nastaje promjena brzine tekućine od one koju ima čvrsta granica do one u kojoj je raspored brzina takav da se strujanje može smatrati idealnim (neviskoznom). Područje takvog strujanja u neposrednoj blizini čvrste podloge (Slika 1.), karakterizirano izrazitim gradijentima brzina, naziva se granični sloj [2, 4, 7].



Slika 1. Razvoj graničnog sloja u cijevnim vodoopskrbnim sustavima, modificirano prema [2]

Daljnijim širenjem graničnog sloja i povećanjem Reynoldsovog broja (Re) laminarno strujanje postaje nestabilno. Unutar graničnog sloja počinje se razvijati turbulencija, radi čega područje laminarnog sloja postaje sve uže, a zona turbulentnog graničnog sloja sve šira, dok na određenoj udaljenosti od početka ploče ne poprimi neku konstantnu vrijednost [2]. Istovremeno se uz podlogu formira vrlo tanki viskozni podsloj karakteriziran vrlo velikim gradijentima brzina s velikim unutarnjim trenjem (Slika 1). Odvajanje graničnog sloja na zakrivljenim konturama događa se neposredno iza promjene predznaka gradijenta tlaka (na prijelazu iz područja ubrzavanja u usporavanje).

Promatrajući fazonske komade (koljena, ventile, zasune, nagla proširenja i sl.) unutar cjelokupnog cijevnog sustava pod tlakom može se reći da oni predstavljaju lokalne ili mjesne točke u sustavu. Iako su strujanja tekućine na takvim mjestima trodimenzionalna, pretpostavlja se da su dimenzije prostora u kojima se strujanje događa zanemarivo male u odnosu na ukupnu duljinu cjevovoda. Stoga se takvi gubici nazivaju lokalnim ili mjesnim. Iz gubitka mehaničke energije koji je posljedica takvog strujanja proizlazi da će visina lokalnih gubitaka biti razmjerna visini kinetičke

energije. Zbog promjena ulaznih i izlaznih brzina na pojedinom poprečnom profilu fazonskog komada potrebno je striktno definirati uz koeficijent lokalnog gubitka i visinu kinetičke energije na koju se on odnosi. Često se u praksi koristi najveća visina kinetičke energije kako bi bili na strani sigurnosti. Jednako kao i koeficijent linijskih gubitaka λ , tako i koeficijent lokalnih gubitaka ζ postaje gotovo konstantna vrijednost pri velikim vrijednostima Re . Neki od značajnijih autora koji su se eksperimentalno bavili analizom određivanja koeficijenata lokalnih gubitaka u cijevnim sustavima pod tlakom su svakako Ito [9], Richter [10], Ward-Smith [11], Hager [12], Idel'cik [13] te Eck [14].

3. Koeficijent lokalnog gubitka energije

Pored utjecaja trenja u cijevnim sustavima pod tlakom javljaju se i gubici nastali uslijed promjena poprečnog presjeka (ventili, račvanja, postepena ili nagla suženja i proširenja cijevi, koljena, lomovi i sl.), a ovise o geometrijskom obliku cijevi. Svaka takva promjena strujne slike remeti normalan raspored brzina u cijevi, pri čemu uslijed djelovanja turbulencije (kinetička energija) dolazi do njene pretvorbe, jednim dijelom u toplinsku i mehaničku energiju. Uslijed koncentrirane sile otpora u smjeru strujanja tekućine, javlja se pad linije energije:

$$\Delta H_e = -\frac{F_o}{\rho g A} \quad \Rightarrow \quad \Delta H_e = C_o \frac{A_o}{A} \frac{v_o^2}{2g} = \zeta \frac{v_o^2}{2g} \quad (1)$$

pri čemu je A_0 površina obuhvaćena turbulencijom, dok simbol A predstavlja površinu poprečnog presjeka cijevi. Koeficijenti lokalnih gubitaka ζ se određuju pokusima u hidrauličkim laboratorijima, dok se osnovni oblici strujanja mogu teoretski analizirati na temelju svojstava odvojenog graničnog sloja.

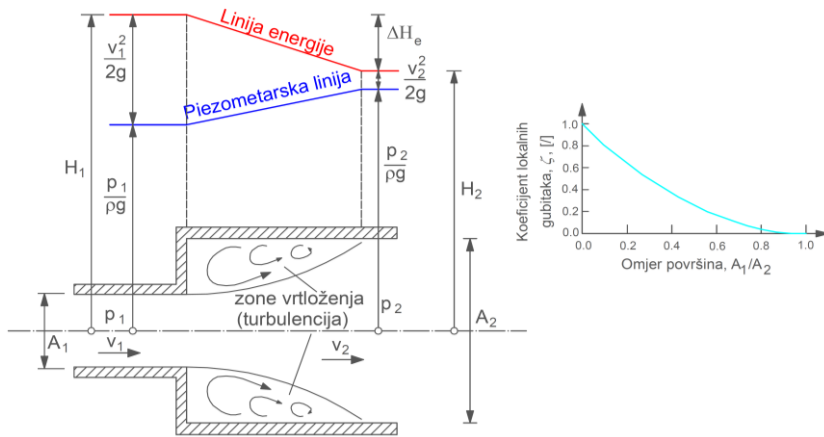
3.1. Naglo proširenje cijevi

Naglo proširenje presjeka cijevi u smjeru strujanja je slučaj odvajanja graničnog sloja gdje se razmjerno jednostavno određuje koeficijent lokalnog gubitka energije (Slika 2) [2, 4]. Gubitak energije je jednak energetskom gubitku za strujanje kroz naglo proširenje, te vrijedi:

$$\Delta H_e = -\frac{(v_2 - v_1)^2}{2g} \quad (2)$$

Ukoliko se (2) izrazi pomoću brzine prije suženja oblik je sljedeći:

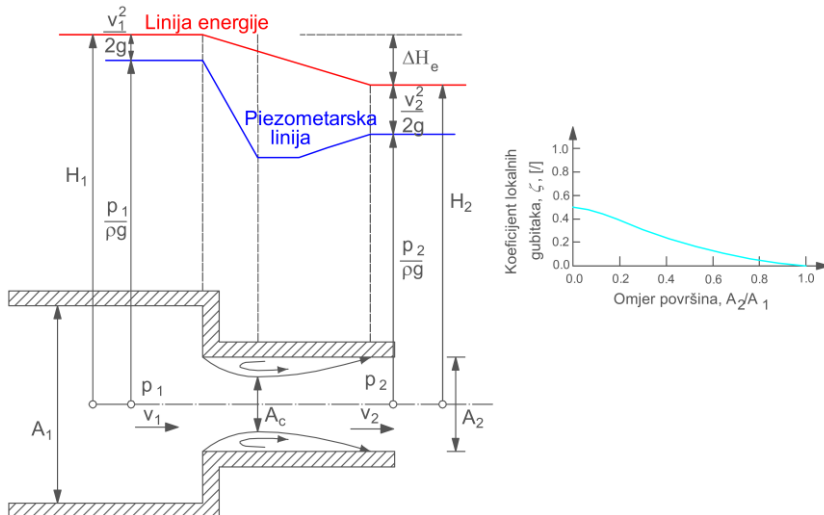
$$\Delta H_e = -\left(\frac{v_2}{v_1} - 1\right) \frac{v_1^2}{2g} = -\left(\frac{A_1}{A_2} - 1\right) \frac{v_1^2}{2g} = -\zeta \frac{v_1^2}{2g} \quad \zeta = \left(\frac{A_1}{A_2} - 1\right)^2 \quad (3)$$



Slika 2. Strujanje tekućine kroz naglo proširenje cijevi, modificirano prema [2, 4]
 Disipacija energije se odvija na potezu koji obuhvaća odvajanje graničnog sloja. U posebnom slučaju kada je proširenje iznimno veliko, tj. kada $A_2 \rightarrow \infty$, koeficijent lokalnog gubitka $\zeta=1$ (pri istjecanju vode u vodospremnik).

3.2. Naglo suženje cijevi

U slučaju naglog suženja protjecajnog presjeka dolazi do odvajanja graničnog sloja i pojave lokalnih otpora (Slika 3). Na početku suženog dijela granični se sloj odvaj, jer postoji oštri lom s kutom većim od 90° .



Slika 3. Strujanje tekućine kroz naglo suženje cijevi, modificirano prema [2,4]

Odvajanje je razmjerno kratko tako da se na početku suženog dijela javlja kontrakcija presjeka površine A_c . U tom je potezu strujanje

ubrzavajuće, tj. konvergentno [1, 4]. Iza presjeka najveće kontrakcije dolazi do usporavajućeg, divergentnog toka u kojem se odvija glavna disipacije energije, tako da se pad energetske visine može pisati u obliku:

$$\Delta H_c = -\frac{(v_c - v_2)^2}{2g} \quad (4)$$

Nakon presjeka najvećeg suženja može se smatrati da se radi o naglom proširenju gdje je v_c brzina u presjeku najveće kontrakcije. Gubitak energetske visine izražava se brzinom u užem presjeku cijevi:

$$\Delta H_c = -\left(\frac{v_c}{v_2} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g} = -\zeta \frac{v_2^2}{2g} \quad (5)$$

Koristeći jednadžbu kontinuiteta $Q=A_c v_c=A_2 v_2$, iz (5) slijedi koeficijent lokalnog gubitka:

$$\zeta = \left(\frac{A_2}{A_c} - 1\right)^2 \quad (6)$$

Ukoliko se površina kontrahiranog poprečnog presjeka izrazi koeficijentom kontrakcije ε u obliku $A_c=\varepsilon A_2$, tada vrijedi:

$$\zeta = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2 \quad (7)$$

Koeficijent kontrakcije ε je funkcija odnosa A_2/A_1 , te se koeficijent lokalnog gubitka kod naglog suženja cijevi izražava tim odnosom. Koeficijent lokalnog gubitka kod naglog suženja cijevi se može izračunati prema formuli profesora Vinka Jovića [2]:

$$\zeta = 0,5(1 - \beta^2) - 0,13[\sin \pi(1 - \beta^2)]^{0,8} \quad (8)$$

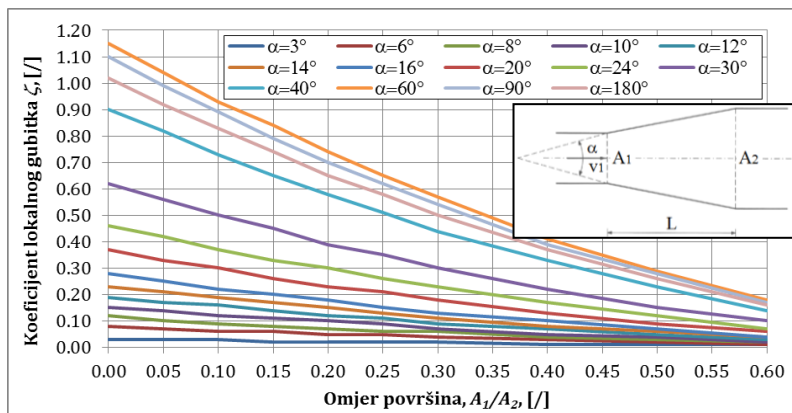
gdje je $\beta=A_2/A_1$. Poseban slučaj naglog suženja predstavljaju ulazni objekti, tj. priključci cjevovoda na spremnike kod kojih je uzvodni poprečni presjek toka znatno veći od presjeka cijevi $A_1 \gg A_2$, tako da je parametar $\beta=0$.

4. Izračun koeficijenata lokalnih gubitaka

4.1. Postepeno proširenje cijevi

Koeficijent lokalnog gubitka ζ za postepeno proširenje cijevi (Dijagram 1.) površine poprečnog presjeka A_1 na veličinu poprečnog presjeka A_2 može se odrediti na temelju vrijednosti središnjeg kuta $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ prema izrazu [2]:

$$\zeta = \varphi(\alpha) \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (9)$$



Dijagram 1. Promjena koeficijenta lokalnog gubitka ovisno o proširenju i središnjem kutu α

Za koeficijent φ koji je u funkciji središnjeg kuta proširenja α vrijedi [2]:

$$\varphi(\alpha) = 3,2 \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{\tan \frac{\alpha}{2}} \quad (10)$$

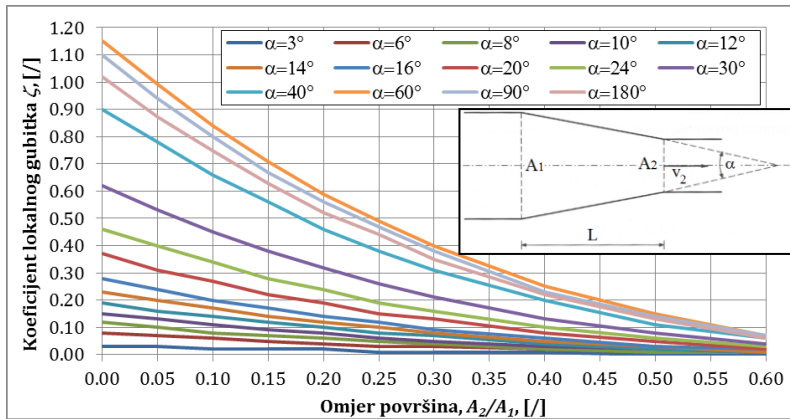
Grafičkim prikazom ovisnosti koeficijenta lokalnog gubitka o proširenju, vidljivo je da povećanjem odnosa A_1/A_2 , odnosno smanjenjem proširenja, koeficijent lokalnog gubitka opada (Dijagram 1.). Kako kut α predstavlja proširenje, njegovim povećanjem koeficijent ζ raste.

4.2. Postepeno suženje cijevi

Koeficijent lokalnog gubitka energije za postepeno suženje cijevi poprečnog presjeka A_1 na poprečni presjek A_2 (Dijagram 2.) ima oblik:

$$\zeta = \zeta^* \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) \quad (11)$$

gdje je ζ^* koeficijent lokalnog gubitka [2]. Grafičkim prikazom ovisnosti koeficijenta lokalnog gubitka o suženju (Dijagram 2.), vidljivo je da povećanjem odnosa A_2/A_1 koeficijent lokalnog gubitka ζ opada. Kako kut α predstavlja suženje, njegovim povećanjem koeficijent ζ rasti.



Dijagram 2. Promjena koeficijenta lokalnog gubitka ovisno o suženju i središnjem kutu α

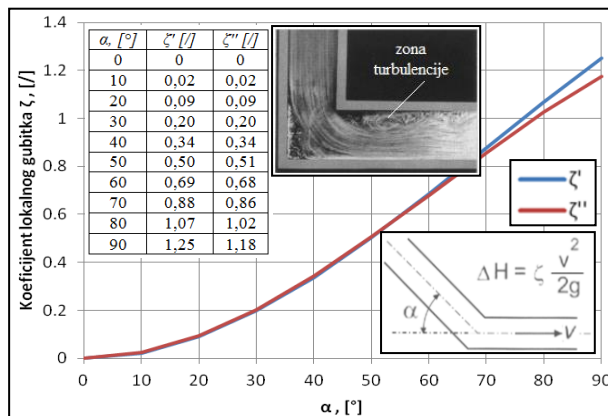
4.3. Oštri lom

Koeficijent lokalnog gubitka za oštri lom cijevi (Dijagram 3.) određen je eksperimentalno formulama prema Agroskinu (12) i Boljšakovu (13), [2]:

$$\zeta' = 3 \sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^4 \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

$$\zeta'' = 3,1 \sin^2 \frac{\alpha}{2} - 1,5 \sin^4 \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

gdje α predstavlja kut loma cijevi. Na dijagramu 3. su također dane dvije



Dijagram 3. Promjene koeficijenata lokalnog gubitka ζ' (po Agroskinu) i ζ'' (po Boljšakovu) ovisno o kutu loma cijevi α (slika modificirana prema [4])

gore spomenute aproksimacije za izračunavanje lokalnih koeficijenata gubitaka kroz odgovarajuće ekstremne podatke. Iz tabličnih podataka u

Dijagramu 3. vidljivo je da koeficijent lokalnog gubitka raste sa povećanjem loma cijevi te da se krivulje dviju aproksimacija podudaraju pri blažim kutovima, sve do kuta loma $\alpha=50^\circ$.

4.4. Koljeno – kružni luk

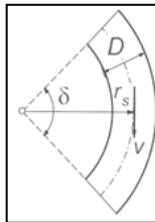
Gubitak tlaka koji nastaje uslijed opstrujavanja tekućine nije samo posljedica separacije na unutarnjoj strani krivine koja stvara koncentriran mlaz u vanjskoj zoni kad tok napušta krivinu, već također zbog uzrokovanog spiralnog kretanja nizvodno (Tablica 1.). Koeficijent lokalnog gubitka u koljenu oblika kružnog luka izračunava se formulom [2]:

$$\zeta = \left[0,131 + 0,163 \left(\frac{D}{r_s} \right)^{3,5} \right] \frac{\delta^\circ}{90^\circ} \quad (14)$$

gdje je δ kut koljena u stupnjevima, D promjer cijevi, a r_s radijus kružnog luka do osi cijevi. Aproksimacija vrijedi za Reynoldsov broj $Re \geq 2 \cdot 10^5$, [2]. Tabličnim prikazom promjene koeficijenta lokalnog gubitka energije (Tablica 1.) vidljivo je da on uglavnom raste sa povećanjem promjera cijevi. Točan interval povećanja koeficijenta se ne može odrediti iz stvarnih dimenzija fazonskih komada jer omjer D/r_s nije konstantan.

Tablica 1. Izračun koeficijenata ζ za kružni luk $\delta=90^\circ$ (lijevo) i kružni luk $\delta=45^\circ$ (desno); skica u tablici preuzeta iz [2]

δ [°]	r_s [mm]	D [mm]	D/r_s [/]	ζ [/]
90	120	60	0,50	0,15
90	122	80	0,66	0,17
90	135	100	0,74	0,19
90	152,5	125	0,82	0,21
90	170	150	0,88	0,24
90	205	200	0,98	0,28
90	290	250	0,86	0,23
90	335	300	0,90	0,24
90	380	350	0,92	0,25
90	425	400	0,94	0,26
90	470	450	0,96	0,27
90	515	500	0,97	0,28
90	605	600	0,99	0,29
90	695	700	1,01	0,30
90	785	800	1,02	0,31



$$\Delta H = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

δ [°]	r_s [mm]	D [mm]	D/r_s [/]	ζ [/]
45	290	60	0,21	0,07
45	331	80	0,24	0,07
45	374	100	0,27	0,07
45	429	125	0,29	0,07
45	483	150	0,31	0,07
45	591	200	0,34	0,07
45	700	250	0,36	0,07
45	809	300	0,37	0,07
45	550	350	0,64	0,08
45	601	400	0,67	0,09
45	652	450	0,69	0,09
45	700	500	0,71	0,09
45	794	600	0,76	0,10
45	900	700	0,78	0,10
45	1000	800	0,80	0,10

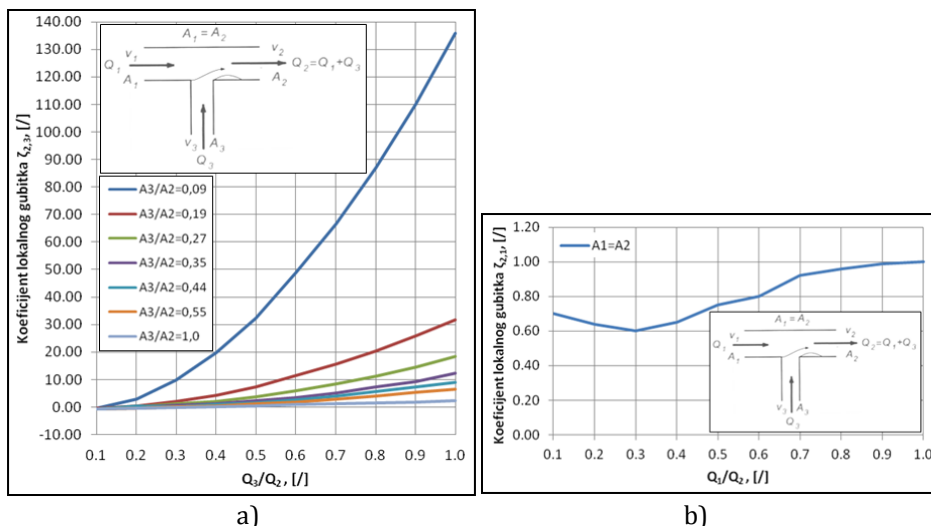
4.5. Okomita „T“ račva

Spajanje bočnog ogranka na glavnu cijev pod pravim kutom naziva se okomita ili „T“ račva (Dijagram 4.). Sa hidrauličkog aspekta razlikuje se spajanje kanala (cijevi) na glavnu cijev i račvanje. Ukoliko promatramo protok uslijed spajanja bočne grane na glavnu cijev (Dijagram 4.a), koeficijent lokalnog gubitka energije je u funkciji protoka koji se spaja na glavnu cijev Q_3 i protoka na kraju glavne cijevi Q_2 :

$$\zeta_{2,3} = f(Q_3/Q_2) \quad (15)$$

Ukoliko se promatra protok po glavnoj cijevi (Dijagram 4.b), koeficijent lokalnog gubitka energije ovisi o protoku na početku cijevi Q_1 i protoku na kraju cijevi Q_2 :

$$\zeta_{2,1} = f(Q_1/Q_2) \quad (16)$$



Dijagram 4. Promjena koeficijenta lokalnog gubitka energije a) $\zeta_{2,3}$ za bočnu granu koja se spaja na glavnu cijev, b) $\zeta_{2,1}$ za glavnu cijev

Na Dijagramu 4. prikazane su vrijednosti koeficijenta lokalnog gubitka energije ovisno o omjeru ulaznog i izlaznog poprečnog presjeka cijevi (A_3/A_2 ; A_1/A_2) te omjeru ulaznog i izlaznog protoka (Q_3/Q_2 ; Q_1/Q_2) za bočnu granu i za glavnu cijev. Iz Dijagrama 4.a), uočljivo je povećanje koeficijenta $\zeta_{2,3}$ bočne grane koja se spaja na glavnu cijev sa povećanjem protoka na izlazu račve Q_2 . Za isti omjer protoka koeficijent je veći ukoliko se poveća promjer glavne cijevi A_2 . Na Dijagramu 4.b) dana je ovisnost koeficijenta $\zeta_{2,1}$ glavne cijevi o omjeru ulaznog i izlaznog protoka.

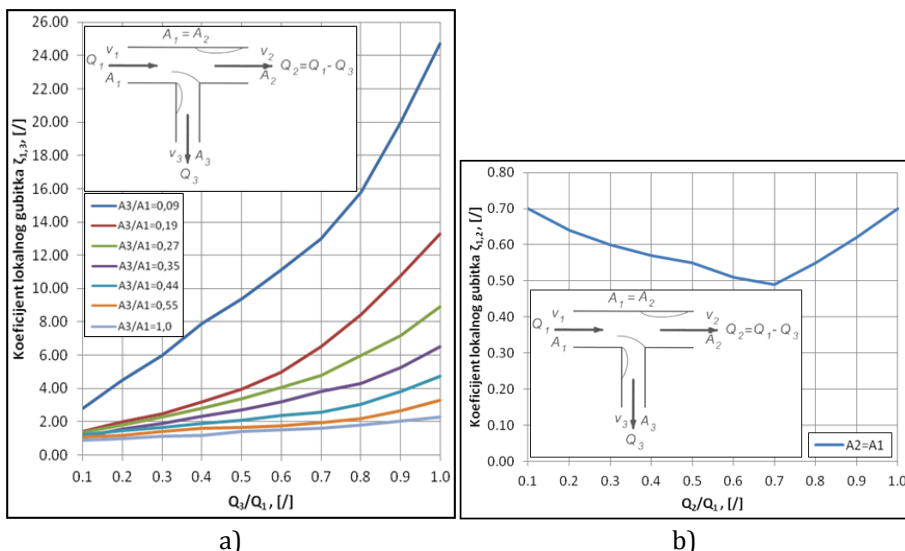
Ukoliko se promatra protok, odnosno račvanje prema bočnoj grani (Dijagram 5.a), koeficijent lokalnog gubitka energije je u funkciji protoka u bočnoj grani Q_3 i protoka na početku glavne cijevi Q_1 :

$$\zeta_{1,3} = f(Q_3/Q_1) \quad (17)$$

Ukoliko se uslijed račvanja promatra protok po glavnoj cijevi (Dijagram 5.b), koeficijent lokalnog gubitka energije ovisi o protoku na početku cijevi Q_1 i protoku na kraju cijevi Q_2 :

$$\zeta_{1,2} = f(Q_2/Q_1) \quad (18)$$

Na dijagramu 5. prikazane su vrijednosti koeficijenta lokalnog gubitka energije ovisno o omjeru ulaznog i izlaznog poprečnog presjeka cijevi (A_3/A_1 ; A_2/A_1) te omjeru ulaznog i izlaznog protoka (Q_3/Q_1 ; Q_2/Q_1) za slučaj račvanja u bočnu granu i za glavnu cijev. Iz Dijagrama 5.a) vidljivo je povećanje koeficijenta $\zeta_{1,3}$ bočne grane sa povećanjem protoka na izlazu račve Q_3 . Za isti omjer protoka koeficijent je veći uz povećanje promjera glavne cijevi A_1 . Na Dijagramu 5.b) dana je ovisnost koeficijenta $\zeta_{1,2}$ glavne cijevi o omjeru ulaznog i izlaznog protoka glavne cijevi uslijed račvanja.



Dijagram 5. Promjena koeficijenta lokalnog gubitka energije a) $\zeta_{1,3}$ za bočnu granu, b) $\zeta_{1,2}$ za glavnu cijev uslijed račvanja protoka Q_1

5. Zaključak

U mnogim slučajevima utjecaj geometrijske promjene oblika cijevi stvara veliki otpor tečenju u sistemu cijevi, osobito ako je taj sistem kratak i sadrži mnogo promjena presjeka. U cijevnom sustavu sa lokalnim gubitcima manjim od 5 % u odnosu na gubitke uslijed otpora površine, oni se u potpunosti mogu nazvati „malim“ i često se zanemaruju u hidrauličkom proračunu. Pri strujanju tekućine kroz cijev sa naglim proširenjem ili suženjem, koeficijent lokalnog gubitka izražen je u ovisnosti o omjerima površina poprečnih presjeka u samim profilima. Može se zaključiti kako će gubici biti manji pri manjim promjenama geometrije, odnosno pri manjim omjerima promjera na početku i na kraju suženja ili proširenja cijevi. Kod naglog proširenja i suženja, koeficijent je ovisan o omjeru poprečnih

presjeka na početku i na kraju fazonskog komada te o središnjem kutu proširenja, odnosno suženja. Tu je vidljivo logično povećanje koeficijenta sa većom promjenom protočnog profila. Kod oštrog loma cijevi izračun koeficijenta lokalnog gubitka ovisi o kutu loma cijevi te on raste sa njegovim povećanjem. Kod kružnog luka koeficijent ovisi o kutu kojeg luk zatvara te omjeru promjera cijevi i polumjera kružnog luka. Kako taj omjer nije konstantan, niti je jednak za različite kutove, teško je jasno napraviti korelaciju između različitih parametara. Može se zaključiti da će gubici rasti sa povećanjem promjera cijevi. Kod „T“ oblika račvi potrebno je zasebno sagledavati slučaj spajanja protoka na glavnu cijev i slučaj račvanja protoka te unutar istih odvojiti gubitke za bočnu granu i glavnu cijev. Pritom je koeficijent gubitaka ovisan o omjerima dolaznih i izlaznih protoka te poprečnih presjeka.

Literatura

- [1] Rouse, H., *Tehnička hidraulika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1969.
- [2] Jović, V., *Osnove hidromehanike*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, Element, 2006.
- [3] Agroskin, I.I., *Hidraulika*, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1969.
- [4] Shaughnessy, E.J., Katz, I.M., Schaffer, J.P., *Introduction to Fluid Mechanics*, Oxford University Press, New York, 2005.
- [5] Parker, S.P., *Fluid mechanics source book*, McGraw-Hill book Company, 1988.
- [6] Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [7] Žic, E., Ožanić, N., Karleuša, B., *Skripta zadataka iz kolegija Hidromehanike*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2010.
- [8] Obuljen, M., *Određivanje lokalnih gubitaka na fazonskim komadima*, Završni rad (Hidromehanika), Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2012.
- [9] Ito, H., Pressure losses in smooth pipe bends, *Journal of Basic Engineering* 82, pp. 131–143., 1960.
- [10] Richter, H., *Pipe hydraulics*, Springer, Berlin, 1971. [in German]
- [11] Ward-Smith, A.I., *Internal fluid flow*, Clarendon Press, Oxford, 1980.
- [12] Hager, W.H., An approximate treatment of flow in branches and bends, Proc. Institution of Mechanical Engineers 198C(4), pp. 63–69., 1984.
- [13] Idel'cik, I.E., *Handbook of hydraulic resistance*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1986.
- [14] Eck, B., *Technical fluid flow*, 9th edition, Springer, Berlin, 1991. [in German]

PRIMJENA HARDY-CROSSOVE METODE U CIJEVNIM SUSTAVIMA POD TLAKOM

APPLICATION OF HARDY-CROSS METHOD IN PIPE SYSTEMS UNDER PRESSURE

Andro Večerina*, Elvis Žic*, Nevenka Ožanić*

Sažetak

U ovom radu opisana je primjena Hardy-Crossove metode za proračun strujanja u vodoopskrbnim sustavima pod tlakom. Hardy-Crossova metoda je primijenjena na prstenastoj vodoopskrbnoj mreži sastavljenoj od četiri petlje (prstena) s ugrađenom pumpom. Za primjenu ove metode potrebno je zadovoljiti jednadžbu kontinuiteta i Bernoullijevu jednadžbu u svim čvorovima i svim cijevima vodoopskrbne mreže. U radu je analizirano strujanje kapljevine kod zadanog opterećenja potrošnje vodoopskrbne prstenaste mreže. Na temelju poznatih vrijednosti potrošnje vode jednog hipotetskog naselja određene su razne ovisnosti pojedinih kinematičkih i hidrauličkih parametara u ovisnosti o ulaznom volumetrijskom protoku. Na kraju rada dan je opis hidrauličkog proračuna vodoopskrbne mreže, odnosno određivanje promjera cijevi, brzina toka, tlakova i linijskih gubitaka po definiranim dionicama u mreži.

Ključne riječi: *Hardy-Crossova metoda, jednadžba kontinuiteta, vodoopskrbni sustav, prstenasta vodoopskrbna mreža, hidraulički proračun*

Abstract

This paper describes the application of Hardy-Cross method for the calculation of a flow in water supply systems under pressure. The Hardy-Cross method is applied to the ring water supply network consisting of four loops (rings) with a built-in pump. In order to apply this method, the equation of continuity and the Bernoulli equation in all the nodes and in the water supply network must be satisfied. The paper analyzes the flow of fluid for a case specified load of consumption of ring network water supply. Based on the known water consumption values of a hypothetical "settlement", various individual dependence of certain kinematic and hydraulic parameters was determined depending on the input volumetric flow.

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: andro.vecerina@student.uniri.hr ; {elvis.zic, nevenka.ozanic}@uniri.hr

In the end, the description and the method of hydraulic calculation of water supply pipe networks is given, that is, determination of pipe diameter, speed flow, pressure and major head losses of the defined pipe sections in the network.

Key words: Hardy-Cross method, continuity equation, water supply system, ring water supply network, hydraulic calculation

1. Uvodno

Hardy-Crossova (HC) metoda se naširoko koristi za proračun stacionarnog strujanja u vodoopskrbnim mrežama pod tlakom. Osnovne jednačbe koje se koriste u navedene svrhe su jednačba kontinuiteta (JK) i Bernoullijeva jednačba (BJ) [1, 2]. Korištenje načela jednačbe kontinuiteta te metode HC danas susrećemo u mnogo praktičnih slučajeva gdje do izražaja dolazi kinematika i dinamika fluida tj., gdje se brzina strujanja (toka) povećava zbog smanjenja promjera cijevi [3]. Klasični primjeri tlačnih sustava su: vodoopskrbni sustavi, plinovodi, naftovodi te sustavi za gašenje požara [4]. Danas se HC metoda [1] često koristi kao podloga za optimizaciju distribucije vode, plina ili nafte u sustavima prstenastih mreža pod tlakom. Među prvima koji su koristili simulacijske metode primjenom HC metode na prstenastim vodoopskrbnim sustavima bili su Epp i Fowler [4]. Šezdesetih i sedamdesetih godina prošlog stoljeća razvijene su prilagodbe za poboljšanje HC metode, pretežno ruskih autora Lobacheva [5] i Andrijasheva [6], ali i Wooda i Charlesa [7] koji su razvili linearnu teoriju podešavanja volumetrijskog protoka povezujući jednačbe petlje s jednačbama čvorova.

2. Proračun brzina, protoka i tlakova u sustavima pod tlakom

U čvoru cijevne vodoopskrbne mreže u kojem se sijeku dvije ili više cijevi opravdano je zanemariti brzinske visine i lokalne gubitke jer su njihovi iznosi zanemarivo mali u odnosu na gubitke uslijed linijskog trenja. Za svaku cijev se može pisati BJ u obliku (1):

$$h_i = h_o + \Delta h_{oi} = h_o + (h_i - h_o) = h_o + \lambda_{oi} \frac{L_{oi}}{D_{oi}} \frac{v_{oi}^2}{2g} \quad (1)$$

pri čemu je h_i piezometarska kota u čvoru i [L], h_o piezometarska kota u čvoru o [L], Δh_{oi} pad piezometarske visine uzduž cijevi $o-i$ [L], λ_{oi} faktor otpora tečenja (koji se definira iz Moodyevog dijagrama ili direktno iz odgovarajućih eksplicitnih ili implicitnih jednačbi) [1], L_{oi} duljina cijevi $o-i$ [L], D_{oi} promjer cijevi $o-i$ [L], te v_{oi} brzina u cijevi $o-i$ [L/T] [8,9].

2.1. Osnove Hardy-Crossove metode

Hardy-Crossova metoda, koja je prvi put korištena 1936. godine, je iterativna metoda za određivanje volumetrijskog protoka u sustavu cijevi gdje su poznati sljedeći podaci: promjeri cijevi, apsolutna hrapavost cijevi, geometrija tlačne mreže te hidraulička opterećenja, odnosno potrebe potrošača. Metoda nastaje adaptacijom metode distribucije momenata savijanja koja je razvijena kako bi se određivali momenti savijanja kod neodređenih statičkih sustava [9].

Prednost HC metode je u tome da se korištenjem jednostavnijih matematičkih proračuna izbjegava potreba za rješavanjem sustava algebarskih jednadžbi. Pritom, loša strana metode je ta da ona iziskuje poznavanje topološke strukturu tlačne mreže, odnosno redni broj dionica koje tvore prstene. Ovaj ulazni podatak nije lako algoritamski odrediti za relativno velike tlačne mreže. Postavljaju se JK u svim čvorovima i BJ u zatvorenim cijevnim elementima, odnosno petljama [10]:

- za svaki čvor suma volumetrijskog protoka Q koji ulaze u čvor mora biti jednaka sumi volumetrijskih protoka koji izlaze iz čvora,
- za svaku cijev mora biti zadovoljena Darcy-Weisbachova jednadžba tj. uspostavljen odnos između pada piezometarske linije i protoka (2):

$$\Delta h = h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{L}{D^5} \frac{8Q^2}{g\pi^2} = SQ|Q| \quad (2)$$

gdje je veličina Q^2 [L^3/T] zamijenjena sa $Q|Q|$ čime se povezuje predznak pada piezometarske linije sa smjerom toka, dok je S [T^2/L^5] pomoćni koeficijent koji objedinjuje preostale veličine. U konačnici, suma gubitaka po zatvorenoj prstenastoj petlji mora biti jednaka 0. Dodatna fizikalna veličina u (2) je $\Delta h = h_f$ koja predstavlja pad piezometarske kote, [L]. Koeficijent otpora trenja λ je u funkciji Reynoldsovog broja Re ($Re = vD/\nu$) i relativne hrapavosti ε/D . Za određivanje vrijednosti λ koriste se adekvatni modeli za područje laminarnog i turbulentnog strujanja [2,3]. Kako je strujanje u vodoopskrbnim cijevima pretežno turbulentno može se primijeniti formula Swameea i Jaina [10](3):

$$\lambda = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}, \quad \text{za } 5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^8, \quad 10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2} \quad (3)$$

pri čemu ε predstavlja visinu apsolutne hrapavosti cijevi [L], te Re Reynoldsov broj [1]. Jednadžba Swamee-Jain je eksplicitna jednadžba i aproksimira Colebrookovu implicitnu formulu s pogreškom unutar 1%.

Postupak inicijalizacije protoka (Q_i) vrši se prije samog hidrauličkog proračuna na način da se svakom protoku u cijevi (dionici cijevne mreže) da njegov mjerodavni smjer toka koji se tijekom iterativne metode ne mijenja. Pored toga, potrebno je usvojiti mjerodavni smjer popravka protoka (ΔQ) po pojedinoj prstenastoj petlji (u smjeru kazaljke na satu ili suprotno; za sve petlje vrijedi isti usvojeni smjer) kako bi se na temelju te pretpostavke moglo izvršiti definiranje korekcija protoka (Slika 2. u nastavku rada). U računskom dijelu rada (Točka 3) dan je detaljan prikaz gore navedenih pretpostavki.

Nakon pretpostavke volumetrijskog protoka u svakoj cijevi petlje potrebno je iterativnim putem (uključujući sve petlje) korigirati sumu pada piezometarske linije dok ona ne postane manja od neke unaprijed definirane tolerancije bliske nuli. U iterativnom postupku korekcije volumetrijskih protoka JK za čvorove se ne narušava. Za svaku cijev unutar petlje vrijedi (4):

$$Q_i^{(k)} = Q_i^{(k-1)} + \Delta Q^{(k)} \quad (4)$$

pri čemu je $Q_i^{(k)}$ protok u i -toj cijevi petlje u k -toj iteraciji, $Q_i^{(k-1)}$ protok u i -toj cijevi određen u prethodnoj iteraciji, odnosno $\Delta Q^{(k)}$ korekcija volumetrijskog protoka u tekućoj iteraciji, jednaka za sve cijevi u istoj petlji. Za svaku cijev u mreži vrijedi (5):

$$\Delta h^{(k)} = h_{fi}^{(k)} = S_i^{(k)} [Q_i^{(k)}]^2 = S_i^{(k)} [Q_i^{(k-1)} + \Delta Q^{(k)}]^2 \quad (5)$$

Budući je korekcija $\Delta Q^{(k)}$ relativno mala veličina, u usporedbi sa članom $Q_i^{(k-1)}$, član $[\Delta Q^{(k)}]^2$, koji se dobije kvadriranjem navedenog binoma (5), se može zanemariti te tako slijedi jednakost (6):

$$\Delta h^{(k)} = h_{fi}^{(k)} = S_i^{(k)} [(Q_i^{(k-1)})^2 + 2Q_i^{(k-1)} \Delta Q^{(k)}] \quad (6)$$

Ukoliko se uvažava usvojeni predznaci orijentacije pozitivnog toka, za svaku zatvorenu petlju vrijedi da je suma pada piezometarske linije zbog otpora trenja u pojedinim cijevima jednaka nuli (u svakoj iteraciji). U rigoroznoj matematičkoj formi se ovaj uvjet može napisati na sljedeći način (7):

$$h_{f1}^{(k)} + \dots + h_{fi}^{(k)} + \dots + h_{fn}^{(k)} = \sum_{i=1}^n h_{fi}^{(k)} = 0 \quad (7)$$

pri čemu je n broj cijevi u određenoj petlji, a $h_{fi}^{(k)}$ pozitivna ili negativna vrijednost pada piezometarske linije za volumetrijski protok Q . Na taj način se može definirati jednakost (8):

$$\sum_{i=1}^n S_i^{(k)} [Q_i^{(k-1)}]^2 + \Delta Q^{(k)} \sum_{i=1}^n 2S_i^{(k)} Q_i^{(k-1)} = 0 \quad (8)$$

iz koje slijedi korekcija volumetrijskog protoka u određenoj petlji, u k -toj iteraciji (9):

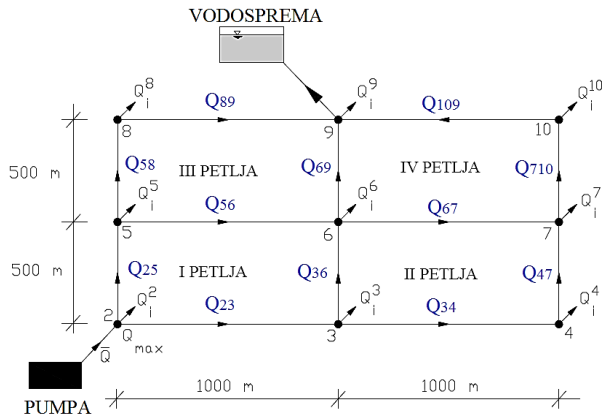
$$\Delta Q^{(k)} = - \frac{\sum S_i^{(k)} Q_i^{(k-1)} |Q_i^{(k-1)}|}{\sum 2S_i^{(k)} |Q_i^{(k-1)}|} \quad (9)$$

Korekcija protoka ΔQ dodaje se volumetrijskom protoku čija se orijentacija poklapa sa pretpostavljenom pozitivnom orijentacijom obilaska petlje, a oduzima od protoka čija je orijentacija suprotna pretpostavljenoj orijentaciji obilaska petlje. Iterativni postupak balansiranja volumetrijskog protoka u cijevnoj mreži treba ponavljati sve dok korekcija ΔQ ne postane dovoljno malena, tj. dok se ne zadovolji kriterij točnosti $|\Delta Q| < \delta$, pri čemu je δ unaprijed zadana tolerancija (prag točnosti) za volumetrijski protok.

3. Primjena Hardy-Crossove metode

U nastavku rada je prikazan proračun određivanja protoka i linijskih gubitaka u prstenastoj vodoopskrbnoj mreži koja se sastoji od četiri petlje (Slika 1). Kao i u praktičnim slučajevima, i u ovom primjeru je potrebno odabrati promjere cijevi tako da se postigne što ravnomjerniji raspored tlaka.

Svi čvorovi u vodoopskrbnoj mreži se nalaze na istoj nadmorskoj visini (kota 0,00 mn.m.). Kota vodnog lica u vodospremi je na 55,00 mn.m. Kota minimalnog tlaka u bilo kojem čvoru vodoopskrbne mreže mora biti veća od 30 mn.m. (~ 3 bara), a kota maksimalnog tlaka u čvoru u kojem se nalazi pumpa ne smije preći 75 mn.m. (~ 7,5 bara). Minimalni promjer cjevovoda pojedinih dionica je $D_{min}=100$ mm s korakom povećanja od 50 mm do promjera od 400 mm, a iznad toga korak povećanja promjera iznosi 100 mm. Pretpostavljene su lijevano-željezne cijevi sa apsolutnom hrapavošću $\varepsilon = 1$ mm. Usvojen kinematički koeficijent viskoznosti iznosi $\nu = 1,175 \cdot 10^{-6}$ m²/s. U primjeru je pretpostavljeno da neiskorištena količina vode nakon zadovoljavanja potrošnje vode u pojedinim čvorovima (čvorovi 2-10) izlazi u točki 9 ($Q_{vodos.}$), gdje potisno teče prema vodospremi. Srednja potrošnja vode u čvorovima mreže ravnomjerno je raspoređena prema dužini cjevovoda koji pripada pojedinom čvoru i iznosi $\bar{q} = 53$ l/s/km, a toliko vode osigurava pumpa. Minimalna potrošnja iznosi $0,6 \cdot \bar{q}$, dok je maksimalna potrošnja definirana kao $1,4 \cdot \bar{q}$.



Slika 1. Shema prstenaste vodoopskrbne mreže

Uvjeti koje treba zadovoljiti putem iterativne analize su sljedeći: i) raspored tlakova u mreži mora biti što ravnomjerniji, ii) tlak na svakom ispusnom mjestu treba biti i pri najnepovoljnijim uvjetima potrošnje veći od usvojenog minimalnog tlaka, iii) piezometarske kote u mreži moraju biti takve da se kod najvećeg opterećenja mreže tj. za najveću potrošnju može raspolagati s dovoljno tlaka za slučaj požara (uzimajući vodu iz jednog ili dva hidranta), iv) radi izbjegavanja velikih pogonskih troškova brzine toka su ograničene u rasponu od 1 do 2 m/s. Pretpostavke s kojima se ulazi u računski dio primjera su: i) potrošnja vode se usvaja u čvorovima mreže, ii) zbog malih vrijednosti brzine toka, lokalni pad piezometarske linije na armaturama se može zanemariti u odnosu na linijske padove piezometarske linije (ili se dodaju kao određeni postotak od linijskih gubitaka (1-2 %)), iii) brzinska visina ($v^2/2g$) se također može smatrati zanemarivo malom [11].

Na temelju srednjeg poznatog specifičnog protoka $\bar{q} = 53$ l/s/km određene su minimalne ($q_{min.} = 0,6 \cdot \bar{q} = 31,8$ l/s/km) i maksimalne ($q_{max.} = 1,4 \cdot \bar{q} = 74,2$ l/s/km) vrijednosti volumetrijskog protoka po kilometru dužnom vodoopskrbne mreže, kao i ukupna dužina svih cjevovoda ($\Sigma L = 6 \cdot 1000 + 6 \cdot 500 = 9$ km). Ukupni maksimalni i srednji volumetrijski protoci u prstenastoj vodoopskrbnoj mreži iznose (10-13):

$$Q_{max.} = q_{max.} \cdot \Sigma L = 74,2 \cdot 9 = 668 \text{ l/s} \quad (10)$$

$$\bar{Q} = \bar{q} \cdot \Sigma L = 53 \cdot 9 = 477 \text{ l/s} \quad (11)$$

$$\Delta = Q_{max.} - \bar{Q} = 191 \text{ l/s} \quad (12)$$

$$\bar{Q} = 4 \cdot 39,75 + 2 \cdot 53 + 2 \cdot 66,25 + 1 \cdot 79,5 = 477 \text{ l/s} \quad (13)$$

U Tablici 1 dan je izračun potrošnje u karakterističnim čvorovima (potrošačima sa koncentriranom potrošnjom vode) zadane prstenaste

vodoopskrbne mreže, dok je u Tablici 2 prikazan način određivanja mjerodavnih volumetrijskih protoka i promjera po pojedinoj dionici vodoopskrbne mreže dobivenih na temelju ulaznog volumetrijskog protoka koji je reguliran pumpom. Promjer cijevi se računa za vrijednost brzine $v = 1,0$ m/s, te se odabrani promjer cijevi $D_{odabr.}$ zaokružuje na jedan red više prema početnom uvjetu (14):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \bar{Q}}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \bar{Q}}{\pi \cdot 1}} \quad (14)$$

Tablica 1. Izračun mjerodavnih protoka u čvorovima (potrošačima sa koncentriranom potrošnjom vode) unutar vodoopskrbne mreže

ČVOR	$\Sigma L/2$	$\Sigma L/2$	$\bar{Q}_i = \bar{q} \cdot \Sigma L/2$	\bar{Q} $Q_{max.}$
[/]	[m]	[km]	[l/s]	[l/s]
2, 4, 8, 10	$(500+1000)/2$	0,75	39,75	191
5, 7	$(500+500+1000)/2$	1	53,00	
3, 9	$(1000+1000+500)/2$	1,25	66,25	
6	$(2 \cdot 1000+2 \cdot 500)/2$	1,5	79,50	
			$\Sigma=477$ l/s	668 l/s

Brzina strujanja po pojedinim dionicama dobiva se na temelju jednadžbe (15):

$$v = \frac{4 \cdot Q_o}{D_{odabr.}^2 \cdot \pi} \quad (15)$$

Na temelju definirane ulazne vrijednosti apsolutne hrapavosti cijevi ε , vrijednost relativne hrapavosti je definirana omjerom ε/D . Temeljem zadanog kinematičkog koeficijenta viskoznosti ν izračunava se Reynoldsov broj Re za svaku dionicu vodoopskrbne mreže. Potom se za određenu vrijednost ε/D i Re određuje faktor linijskih gubitaka λ za svaku dionicu vodoopskrbne mreže prema (3). Koeficijent S se dobiva prema izrazu (2) te se usvaja da je tokom iteracija konstantan. Nakon što je koeficijent S definiran za svaku cijev, proračun se nastavlja određivanjem protoka u pojedinoj dionici iterativnom metodom koja se zasniva na pretpostavci da je suma pada piezometarske linije u svakoj petlji jednaka nuli, uzimajući u obzir usvojene predznake pozitivne orijentacije toka (Tablica 3). Točnost proračuna se usvaja do na drugu značajnu znamenku.

Tablica 2. *Određivanje mjerodavnih protoka i promjera po pojedinim dionicama prstenaste vodoopskrbne mreže (zelena boja – čvorovi sa koncentriranom potrošnjom vode, plava boja – protok po dionicama cijevne mreže, narančasta boja – protok prema vodospremi, crvena boja – mjerodavni promjer cijevi)*

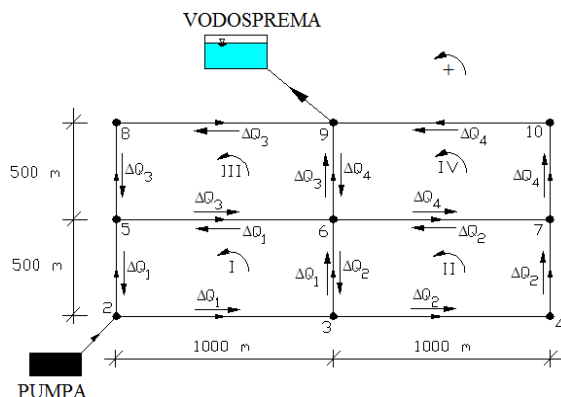
ULAZ		IZLAZ		Q _o	D	D _{odabr.}	v	ε/D	Re	λ	S
Q	Q _{ulaza}	ČVOR	Q _{izlaza}								
668,00	Q _{max.}	2	Q ₂	39,750	0,693	0,70	0,98	0,0014	583338	0,0220	10,80
			Q ₂₃	376,83	0,566	0,60	0,89	0,0017	453707	0,0229	12,17
			Q ₂₅	251,42							
			Q ₃	66,25							
376,83	Q ₂₃	3	Q ₃₄	186,35	0,487	0,50	0,95	0,0020	403857	0,0240	63,43
			Q ₃₆	124,23	0,398	0,40	0,99	0,0025	336547	0,0255	102,73
			Q ₄	39,75							
186,35	Q ₃₄	4	Q ₄₇	146,60	0,432	0,50	0,75	0,0020	317710	0,0241	31,90
			Q ₅	53,00							
251,42	Q ₂₅	5	Q ₅₆	79,30	0,318	0,35	0,83	0,0029	245478	0,0265	417,42
			Q ₅₈	119,12	0,389	0,40	0,95	0,0025	322190	0,0255	102,83
			Q ₆	79,50							
79,30	Q ₅₆	6	Q ₆₇	62,01	0,281	0,30	0,88	0,0033	223982	0,0277	941,10
124,23	Q ₃₆		Q ₆₉	62,02	0,281	0,30	0,88	0,0033	223982	0,0277	470,55
62,01	Q ₆₇		Q ₇	53,00							
146,60	Q ₄₇	7	Q ₇₁₀	155,61	0,445	0,50	0,79	0,0020	337237	0,0241	31,85
			Q ₈	39,75							
119,12	Q ₅₈	8	Q ₈₉	79,37	0,318	0,35	0,82	0,0029	245150	0,0265	417,43
79,37	Q ₈₉		Q ₉	66,25							
62,02	Q ₆₉	9	Q _{vodos.}	191,00	0,493	0,50	0,97	0,0020	413505	0,0240	63,40
115,86	Q ₉₁₀										
			Q ₁₀	39,75							
155,61	Q ₇₁₀	10	Q ₁₀₉	115,86	0,384	0,40	0,92	0,0025	313862	0,0255	205,77

Prije samog proračuna treba usvojiti shemu proračuna, odnosno definirati predznake orijentacije toka u pojedinoj petlji (Slika 2). Usvojeni predznaci orijentacije toka ostaju nepromijenjeni tijekom iterativnog proračuna. Za protok pojedine cijevi vrijedi da je nova vrijednost volumetrijskog protoka jednaka staroj vrijednosti protoka kojoj je dodana korekcija ΔQ , tj. suma korekcija po petlji i utjecaj korekcija ostalih petlji ($Q_{novi} = Q_{stari} + \Delta Q$). Primjera radi, novi protok na dionici 2-3 ($Q_{2-3,novi} = Q_{1,(2-3)}$, protok u 1. iteraciji) je jednak sumi protoka iz prethodne iteracije ($Q_{2-3,stari}$ (Q_o iz Tablice 2.)) i popravnom volumetrijskom protoku po prvoj petlji (ΔQ_I) (16):

$$Q_{2-3,novi} = Q_{1,(2-3)} = Q_{2-3,stari} + \Delta Q_I = 376,83 + 2,576 = 379,41 \text{ l/s} \quad (16)$$

Vrijednost korekcije protoka prve petlje ΔQ_I jednaka je (izraz (9))(17):

$$\Delta Q_{\text{prva petlja}} = \frac{-\{(10,8 \cdot 376,83^2) + (102,73 \cdot 124,23^2) + (417,42 \cdot (-79,3) \cdot 79,3) + (12,17 \cdot (-251,42) \cdot 251,42)\}}{2 \cdot \{(10,8 \cdot 376,83) + (102,73 \cdot 124,23) + (417,42 \cdot 79,3) + (12,17 \cdot 251,42)\}} = 2,579 \text{ l/s} \quad (17)$$



Slika 2. Definiranje sheme hidrauličkog proračuna

Mjerodavni protok grane 3-6 ima utjecaja na korekcije volumetrijskog protoka u petljama I i II (Tablica 3) (18):

$$Q_{3-6, \text{novi}} = Q_{1,(3-6)} = Q_{3-6, \text{stari}} + \Delta Q_I - \Delta Q_{II} = 113,59 \text{ l/s} \quad (18)$$

pri čemu je vrijednost korekcije volumetrijskog protoka prve petlje ΔQ_I prethodno određena, a korekcija po drugoj petlji ΔQ_{II} definirana izrazom (19):

$$\Delta Q_{\text{petlja II}} = \frac{-\{(63,43 \cdot 186,35^2) + (31,9 \cdot 146,6^2) + (941,1 \cdot (-62,01) \cdot 62,01) + (102,73 \cdot (-124,23) \cdot 124,23)\}}{2 \cdot \{(63,43 \cdot 186,35) + (31,9 \cdot 146,6) + (941,1 \cdot 62,01) + (102,73 \cdot 124,23)\}} = 13,217 \text{ l/s} \quad (19)$$

Na analogan način se vrši proračun ostalih volumetrijskih protoka po pojedinim granama tj. cijevima vodoopskrbne mreže uzimajući pritom utjecaj korekcija volumetrijskog protoka pojedinih petlji. Proračun se iterativno ponavlja sve dok posljednje dvije iteracije, odnosno vrijednosti volumetrijskih protoka po grani u dvije susjedne iteracije ne postanu jednake do na drugu značajnu znamenku. Tada se proračun smatra završenim i usvaja se konačna vrijednost volumetrijskog protoka iz posljednje iteracije (Tablica 3).

Tablica 3. Hidraulički proračun prstenaste vodoopskrbne mreže pri stacionarnom strujanju (prikazane su prve dvije i posljednje dvije iteracije u proračunu); plava boja – konačni usvojeni protoci po pojedinoj grani, žuta boja – linijski gubici po pojedinoj grani, narančasta boja – vrijednosti sume linijskih gubitaka po pojedinoj petlji (male vrijednosti predstavljaju veliku točnost proračuna)

PETLJA	GRANA	ΔQ [l/s]	S [s ² /m ⁵]	Q_0 [l/s]	ΔQ_0 [l/s]	S [s ² /m ⁵]	Q_1 [l/s]	ΔQ_1 [l/s]
1	2 - 3	$Q_{23} + \Delta Q_I$	10,80	376,83	2,5790	10,80	379,41	2,2152
	3 - 6	$Q_{36} + \Delta Q_I - \Delta Q_{II}$	102,73	124,23		102,73	113,59	
	5 - 6	$Q_{56} + \Delta Q_I - \Delta Q_{III}$	417,42	-79,30		417,42	-75,03	
	2 - 5	$Q_{25} + \Delta Q_I$	12,17	-251,42		12,17	-248,64	
2	3 - 4	$Q_{34} + \Delta Q_{II}$	63,43	186,35	13,2171	63,43	199,57	-12,9097
	4 - 7	$Q_{47} + \Delta Q_{II}$	31,90	146,60		31,90	159,82	
	6 - 7	$Q_{67} + \Delta Q_{II} - \Delta Q_{VI}$	941,10	-62,01		941,10	-25,83	
	3 - 6	$Q_{36} + \Delta Q_{II} - \Delta Q_I$	102,73	-124,23		102,73	-113,59	
3	5 - 6	$Q_{56} + \Delta Q_{III} - \Delta Q_I$	417,42	79,30	-1,6820	417,42	75,03	-5,9509
	6 - 9	$Q_{69} + \Delta Q_{III} - \Delta Q_{IV}$	470,55	62,02		470,55	83,29	
	8 - 9	$Q_{89} + \Delta Q_{III}$	417,43	-79,37		417,43	-80,86	
	5 - 8	$Q_{58} + \Delta Q_{III}$	102,83	-119,12		102,83	-120,61	
4	6 - 7	$Q_{67} + \Delta Q_{IV} - \Delta Q_{II}$	941,10	62,01	-22,963	941,10	25,83	1,7296
	7 - 10	$Q_{107} + \Delta Q_{IV}$	31,85	155,61		31,85	132,65	
	9 - 10	$Q_{910} + \Delta Q_{IV}$	205,77	115,86		205,77	92,90	
	6 - 9	$Q_{69} + \Delta Q_{IV} - \Delta Q_{III}$	470,55	-62,02		470,55	-83,29	

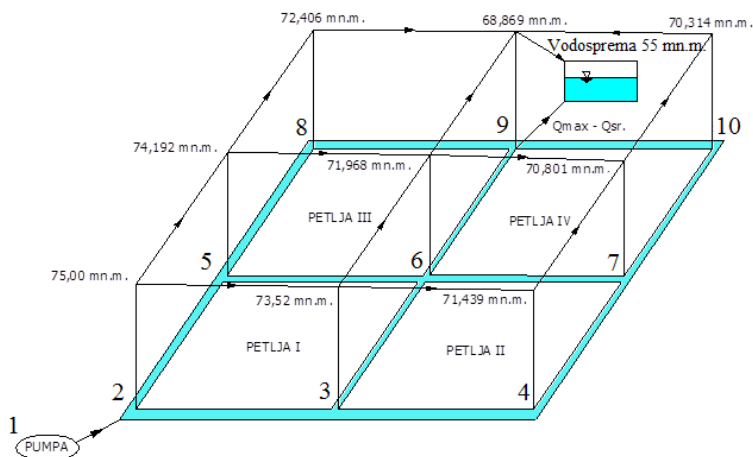


Q_{21} [l/s]	ΔQ_{21} [l/s]	S [s ² /m ⁵]	Q_{22} [l/s]	$Q_{konač}$ [m ³ /s]	$\Delta h = S \cdot Q \cdot Q $ [m]	SUMA Δh PO PETLJI [m]	ČVOR	$h_i = h_{i-1} - \Delta h$ [m n.m.]
370,28	0,0034	10,80	370,28	0,37028	1,4803	0,000853	2	75,000
122,89		102,73	122,90	0,12290	1,5518		3	73,520
-72,99		417,42	-72,97	-0,07297	-2,2228		6	71,968
-257,77		12,17	-257,77	-0,25777	-0,8083		5	74,192
181,15		63,43	181,13	0,18113	2,0812		3	73,520
141,40	-0,0118	31,90	141,38	0,14138	0,6376	0,000300	4	71,439
-35,20		941,10	-35,22	-0,03522	-1,1673		7	70,801
-122,89		102,73	-122,90	-0,12290	-1,5518		6	71,968
72,99	417,42	72,97	0,07297	2,2228	5	74,192		
81,17	-0,0091	470,55	81,16	0,08116	3,0992	0,000454	6	71,968
-92,03		417,43	-92,04	-0,09204	-3,5364		9	68,869
-131,78		102,828	-131,79	-0,13179	-1,7861		8	72,406
35,20	0,0032	941,100	35,22	0,03522	1,1673	0,001477	6	71,968
123,60		31,847	123,60	0,12360	0,4865		7	70,801
83,85		205,773	83,85	0,08385	1,4468		10	70,314
-81,17	470,550	-81,16	-0,08116	-3,0992	9	68,869		

Piezometarska kota na pojedinom čvoru se dobiva na temelju poznate piezometarske kote u čvoru 2 gdje je definirana pumpa s manometarskom visinom na koti 75 mn.m. od koje se oduzimaju linijski gubici pojedinih grana (Tablica 3 - posljednji stupac, Slika 3) (20):

$$h_i = h_{i-1} - \Delta h \Rightarrow h_{10} = h_{pumpe} - \Delta h_{2-3} - \Delta h_{3-6} - \Delta h_{6-9} + \Delta h_{9-10} \quad (20)$$

Iz proračunatih kota piezometarske linije (radnih tlakova) na pojedinim čvorovima može se konstruirati model opadanja piezometarske linije po grani (od čvora do čvora) prateći smjer toka unutar prstenaste vodoopskrbne mreže pri stacionarnom režimu tečenja, Slika 3.



Slika 3. Model stacionarnog strujanja u prstenastoj vodoopskrbnoj mreži sa prikazom promjena piezometarske linije (radnih tlakova)

4. Zaključak

Primjena HC metode je iznimno praktična. Ona može dati vrlo dobre rezultate kroz hidraulički proračun za jednostavne ili složene prstenaste mreže kojima se opskrbljuje voda, plin ili nafta. Metoda se može koristiti u svrhu izrada hidrauličkih analiza koje se mogu koristiti u sljedeće svrhe: prognoze cijena izgradnje budućeg vodoopskrbnog ili sličnog sustava, definiranja granične vrijednosti brzina toka, definiranja mjerodavnih promjera cijevi za ugradnju, definiranja ukupnih gubitaka, definiranja tlakova u mreži na pojedinim čvorovima sa koncentriranom potrošnjom vode i slično. Kao takva, primjena ove metode može osigurati pouzdana rješenja za adekvatnu optimalizaciju postojećih i budućih prstenastih cijevnih sustava pod tlakom.

U ovom radu opisana je primjena HC metode za proračun stacionarnog strujanja na prstenastoj vodoopskrbnoj mreži sastavljene od četiri petlje (prstena). Ista metoda se može primijeniti i na složenijim vodoopskrbnim sustavima sa više petlji koje ne moraju biti isključivo pravokutnog ili kvadratnog prstenastog oblika (primjena trokutnih petlji ili petlji sastavljenih od više uzajamno spojenih cijevi). Također, postoji mogućnost primjene ove metode na sustavima pod tlakom sa petljama u mreži različitih vrsta materijala, odnosno vrsta cijevi. Takva primjena HC metode može biti upotrijebljena kod rekonstrukcije (ili nadogradnje) postojećih zastarjelih dijelova vodoopskrbne mreže pojedinog dijela grada ili naselja koji koristi prstenasti vodoopskrbni sustav.

Literatura

- [1] Cross, H., Analysis of flow in networks of conduits or conductors, *Eng. Exp. Station*, 286, p. 3-29, 1936.
- [2] Shaughnessy, E.J., *Introduction to Fluid Mechanics*, Oxford University Press, Oxford, 2005.
- [3] Jović, V., *Osnove hidromehanike, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, Element, 2006.*
- [4] Epp, R., Fowler, A.G., Efficient code for steady flows in networks, *J. Hydraul Div. Am. Soc. Civil Engineering*, 96(1), p. 43-56, 1970.
- [5] Latysenkov, A.M., Lobachev, V.G., *Hydraulics*, 3rd edition, Moscow, 1956.
- [6] Andriyashev, M.M., *Hydraulics calculation of water distribution networks*, 1st edition, Moscow, 1964.
- [7] Wood, D.J., Charles, C.O.A., Hydraulic network analysis using linear theory, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civil Engineering*, 98(7), p. 1157-1170, 1972.
- [8] Gjetvaj, G., *Skripta predavanja iz kolegija Hidraulika*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [9] Brkić, D., An improvement of Hardy Cross method applied on looped spatial natural gas distribution networks, *Applied Energy*, 86, p. 1290-1300, 2009.
- [10] Žic, E., *Skripta zadatka iz kolegija Hidraulike – tablični kalkulator za proračun stacionarnog tečenja u prstenastim vodoopskrbnim mrežama*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2005.
- [11] Večerina, A., *Primjena Hardy-Crossove metode u sustavima pod tlakom, Završni rad (Hidromehanika)*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2012.

PRIMJENA NORME HRN EN 12056 : 2005 – GRAVITACIJSKI ODVODNI SUSTAVI U ZGRADAMA

APPLICATION OF HRN EN 12056 : 2005 – GRAVITY DRAINAGE SYSTEMS INSIDE BUILDINGS

Nives Klobučar*, **Nina Stanišić Bukvić****, **Velimir Labinac*****,
Mirna Klobučar****

Sažetak

Od implementacije norme EN 12056 – Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama u hrvatski sustav normi prošlo je deset godina. Iako je to bila prva hrvatska norma vezana uz tematiku kućne odvodnje te je donijela mnoge novosti i znatne promjene u odnosu na normu koja se je na ovim prostorima, u nedostatku zakonske regulative, koristila za istu svrhu (DIN 1986 – Kanalizacija zgrada i parcela), nije bila osobito zamijećena od strane projektanata kućnih hidroinstalacija. Područje primjene HRN EN 12056 je ograničeno isključivo na zgradu i cilj joj je da osigura nesmetano i sigurno odvođenje sanitarno potrošnih i oborinskih voda iz zgrade uvažavajući uočene manjkavosti starih normi i propisa, a osobito uvažavajući nove klimatske uvjete. Stoga su mnogi zahtjevi pooštreni, a postupci dokazivanja hidrauličke ispravnosti sustava složeniji. S druge strane, prilagođavajući se velikom tržištu manjih stambenih zgrada, hidraulički proračuni za kućnu odvodnju su pojednostavljeni. Dodatna pažnja posvećena je ventilaciji tj. odzračivanju i dozračivanju odvodnih sustava. Važno je istaknuti da norma rješava jednu od čestih dilema projektanata: definirani su unutarnji promjeri cijevi na temelju kojih se izrađuju hidraulički proračuni, neovisno o vrsti materijala. Nadalje, iako se u nazivu norme spominju gravitacijski sustavi, četvrti dio norme se odnosi na kućne crpne stanice sa svim njihovim specifičnostima. Nažalost, norma nije dala upute o postupku ispitivanja vodonepropusnosti već upućuje na regulativu pojedine države ili na uvjete zadane ugovorom o izvođenju radova.

* PROJEKT – H d.o.o., Pulac 50/2, 51 000 Rijeka

E-mail: nives.klobucar@uniri.hr

** PROJEKT – H d.o.o., Pulac 50/2, 51 000 Rijeka

E-mail: projekth.ri@gmail.com

*** Odjel za fiziku, Sveučilište u Rijeci, Radmile Matejčić 2, 51000 Rijeka

E-mail: velimir.labinac@ri.ht.hr

**** Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka, student

E-mail: mirna.klobucar@gmail.com

Ovaj rad želi potaknuti interes za normu HRN EN 12056 koja je dala odgovore na mnoga pitanja vezana uz projektiranje i izvođenje odvodnih sustava u zgradama, ali je isto tako ostavila neka pitanja otvorenima za daljnju dopunu putem drugih regulatornih akata.

Ključne riječi: *HRN EN 12056 : 2005, implementacija, kućna odvodnja, odzračivanje, vodonepropusnost*

Abstract

It has been ten years since the implementation of EN 12056 - Gravity drainage systems inside buildings into the Croatian system standard (Croatian regulatory system) Although it was the first Croatian standard related to the topic of domestic sewage which brought many innovations and significant changes in relation to the norm of this region, in the absence of regulations used for the same purpose (DIN 1986 - Sewage buildings and grounds) it was not particularly noticed by the building drainage designers. Scope EN 12056 is limited to buildings and its aim is to ensure the smooth and safe discharge of sanitary and stormwater from the building, taking into account the perceived shortcomings of the old standards and regulations and particularly taking into account the new climate conditions. Therefore, many of the requirements became more demanding and procedures for proving the validity of the hydraulic system more complex. On the other hand, adapting to the large market of small apartment buildings, hydraulic design for home drainage was simplified. Additional attention was paid to ventilation, i.e. venting and aeration drainage systems. It is important to point out that the norm solves one of the most common designer dilemmas: determination of the inner diameter of the pipe which is important for hydraulic calculations regardless of the type of material. Furthermore, although the name of standard includes gravity systems, the fourth part of this standard applies to household pumping stations with all their specifics. Unfortunately, the norm has not provided instructions on the procedure for both tightness test and performance test but refers to the local practice or contractual requirement. This paper should encourage interest in the standard HRN EN 12056 which gave answers to many questions related to the design and execution of drainage systems in buildings but also left some questions open to further amendment through other regulations.

Key words: *HRN EN 12056 : 2005, implementation, building drainage, ventilation, water tightness*

1. Uvod

Ulaskom u Europsku uniju, ali i prije toga, u Hrvatskoj su se počele prihvaćati i primjenjivati europske norme i standardi. S obzirom na opsežnost tog posla, on ni do danas nije u potpunosti dovršen. Primjerice, samo su neke norme prevedene na hrvatski jezik, a među njima se, nažalost, ne nalazi norma HRN EN 12056 [1].

U području odvodnje u zgradama prije dolaska europskih normi, na nivou države su postojale samo norme za proizvode i za radove, ali ne i za projektiranje. U tu svrhu su se projektanti snalazili koristeći svoje iskustvo, interne akte komunalnih poduzeća i uzance prihvaćene iz stranih propisa (starijih francuskih, odnosno najčešće njemačkih).

Najviše korištena norma za projektiranje odvodnje zgrada bila je DIN 1986: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke (Kanalizacija zgrada i parcela) (1978.) [2], zatim smjernice na temelju skupa saveznih pravilnika SAD-a prilagođenih našim prilikama te „Smjernice za izvedbu interne kanalizacije,“ namijenjene za primjenu na području grada Zagreba (još iz 1969.g.) [3]. Stoga je dolazak norme koja bi i projektantima i izvođačima, ali i djelatnicima komunalnih firmi bila glavni izvor podataka i pomoć u projektiranju, izvođenju i održavanju sustava odvodnje u zgradama trebao biti popraćen velikom pažnjom i vrlo brzo primijenjen u praksi. To se, međutim, nije dogodilo, a postoje tome i opravdani razlozi. U daljnjem tekstu će se navesti neki općeniti podaci o sadržaju norme HRN EN 12056 [1], naglasit će se novosti, korisni podaci, ali i nedostaci s gledišta projektanta hidroinstalacija.

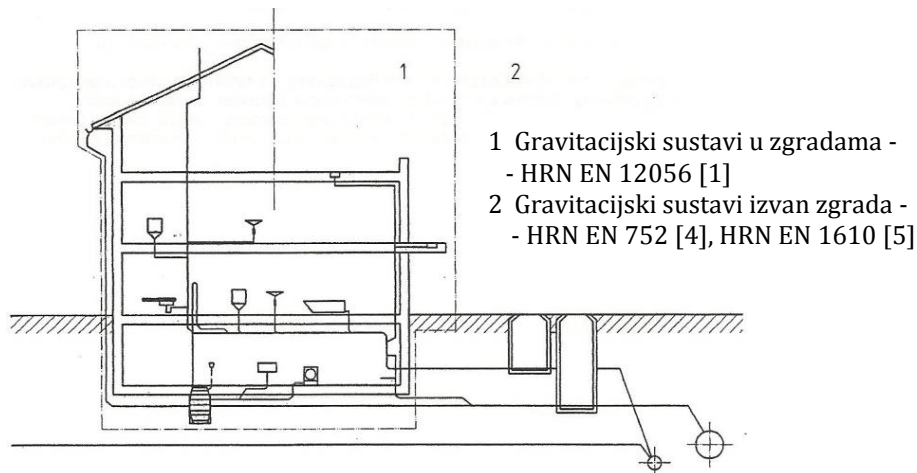
2. Podaci o sadržaju norme HRN EN 12056

Svrha norme HRN EN 12056 [1], kao i mnogih ostalih, je da, što je moguće detaljnije, definira područje o kojem govori. Stoga je relativno opsežna te je podijeljena u pet cjelina:

1. dio: Opći i izvedbeni zahtjevi,
2. dio: Sanitarni cjevovod, nacrt i proračun,
3. dio: Krovna odvodnja, nacrt i proračun,
4. dio: Postrojenja za dizanje otpadne vode,
5. dio: Postavljanje i ispitivanje, upute za rad, održavanje i uporabu.

2.1. Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama - 1. dio: Opći i izvedbeni zahtjevi (EN 12056 - 1 : 2000)

Već na samom početku 1. dio norme jasno prikazuje da se odnosi isključivo na područje zgrade (Slika 1). Područje izvan zgrade je pokriveno drugim normama (HRN EN 752 : Odvodni i kanalizacijski sustavi izvan zgrada [4] te HRN EN 1610 : Polaganje i ispitivanje kanalizacijskih cjevovoda i kanala) [5].



Slika 1. Područje primjene normi [1].

Ovo je prva razlika u odnosu na DIN 1986 [2] koji osim zgrade uključuje i odvodnju na pripadajućoj parceli. U nastavku ovog dijela norme se daje pregled definicija pojedinih pojmova i upućuje na regulativu pojedinih država članica EU.

Umjesto dugo očekivanog opisa ispitivanja, kako vodonepropusnosti, tako i cjelokupnog rada sustava odvodnje zgrade, nailazimo na upućivanje na nacionalne ili lokalne propise ili praksu ili pak zahtjeve zadane ugovorom o izvođenju.

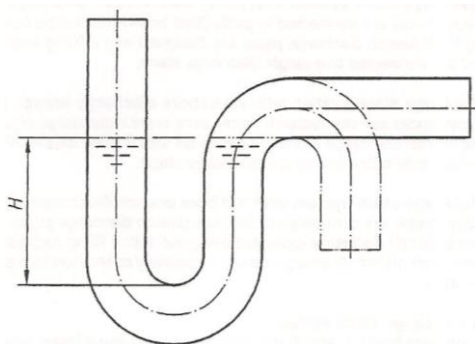
2.2. Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama - 2. dio: Sanitarni cjevovod, nacrt i proračun (EN 12056 – 2 : 2000)

Prema normi postoje četiri tipa sustava sanitarne kanalizacije, ovisno o ispunjenosti odvodnih cijevi koje se priključuju na odvodnu vertikalnu:

- Sustav I: jedna odvodna vertikalna s djelomično (50%) ispunjenim priključnim odvodnim granama,
- Sustav II: jedna odvodna vertikalna s priključnim granama malog profila s ispunjenošću cijevi 70%,
- Sustav III: jedna odvodna vertikalna s priključnim odvodnim granama s ispunjenošću 100%; svaka od grana je zasebno spojena na vertikalnu,
- Sustav IV: odvodni sustavi tipa I, II i III mogu biti izvedeni kao separativni sustavi za crne (otpadne vode iz WC - školjki i pisoara) i za sive otpadne vode (iz ostalih sanitarnih uređaja, perilica rublja i posuđa).

Također su navedeni već poznati razni sustavi ventilacije (odzrake) kućne kanalizacije u svrhu regulacije tlaka u cijevima: primarni i sekundarni sustav s varijacijama, ali bez proračuna ili preporuka za dimenzioniranje ventilacijskih cijevi već se projektant upućuje na nacionalne ili lokalne propise ili praksu.

Na početku svakog dijela norme je naveden konkretan podatak da visina vode u sifonu (Slika 2) mora biti $H_{\min} = 50$ mm što svjedoči o važnosti takve izvedbe iako je prvenstveno namijenjen proizvođačima cijevi i opreme za sanitarne uređaje.



Slika 2. Minimalna visina vode u sifonu [1].

U svrhu detaljnijeg definiranja hidrauličkog proračuna cijevne mreže, u poglavlju 6. u normi [1] su definirani minimalni unutarnji (hidraulički) promjeri za svaki pojedini nominalni promjer (DN) (Tablica 1). Time je riješena uvijek prisutna dilema projektanata vezana uz promjere cijevi jer je za isti nominalni promjer, a za različite vrste cijevi tj. materijala od kojeg su cijevi izrađene, unutarnji promjer (d_i) različit, npr. DN 110: za PVC cijev je $d_i = 107,8$ mm, za PP cijev je kod nekih proizvođača $d_i = 107,3$ mm, a kod drugih $d_i = 106,4$ mm, za lijevano željezne je $d_i = 106,5$ mm. Međutim, za uobičajene promjere u odvodnji, DN 75 i 110 mm, u Tablici 1 nisu dane odgovarajuće vrijednosti.

Tablica 1. Tablica s nominalnim promjerima i pripadajućim unutrašnjim hidrauličkim promjerima.

Nominal diameter	Minimum internal diameter
DN	d_{\min} mm
30	26
40	34
50	44
56	49
60	56
70	68
80	75
90	79
100	96
125	113
150	146
200	184
225	207
250	230
300	290

Hidraulički proračun donosi novost: izračun se izvodi pomoću jedinica otjecanja DU (discharge unit) čija vrijednost ovisi o pripadnosti vrsti sustava (I, II, III ili IV) gdje razlike mogu biti značajne. Na primjer, ukoliko se perilica posuđa nalazi u Sustavu I ima $DU = 0,8$ l/s, a u Sustavu III pripada joj $DU = 0,2$ l/s. Razlika u odnosu na DIN 1986 je očita: perilici posuđa pripada 1 AWs (1,0 l/s). AWs označava priključnu vrijednost sanitarnih i drugih uređaja [6]. Ukupni protok se izračunava pomoću koeficijenta istovremenosti (učestalosti) koji ovisi o vrsti zgrade: stambene zgrade i uredi, javne ustanove kao bolnice i škole, javni sanitarni čvorovi te, kao četvrta kategorija, specijalizirane ustanove, npr. laboratoriji.

U nastavku norme daju se detaljne upute o načinu ugradnje sanitarnih uređaja ovisno o udaljenosti od vertikalne i sustavu ventilacije kanalizacije. Također su priložene praktične tablice za kapacitet cijevi izračunate po Colebrook - White formuli uz hrapavost $k_b = 1,0$. Priložen je i jedan konkretan primjer izračuna.

2.3. Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama - 3. dio: Krovna odvodnja, nacrt i proračun (EN 12056 - 3 : 2000)

Ovaj dio norme je najobimniji s vrlo detaljnim uputama koje uključuju čak i blok dijagrame (Anex D) za proceduru postupka izračuna. Za proračun ukupne količine oborinske vode koristi se racionalna metoda. Uzimajući u

obzir da ne postoje svugdje podaci o intenzitetima, priložena je općenita tablica. U proračun se uzimaju faktori rizika ovisno o poziciji oluka na zgradi i važnosti zgrade. U obzir se može uzeti i utjecaj vjetra s kišom na vertikalni zid (npr. zabatni zid) s kojeg oborine otječu na promatrani krov – u tom slučaju se površina vertikalnog zida uzima s maksimalno 50 % površine. Međutim, nigdje nije propisan povratni period niti vrijeme površinske koncentracije.

Osobito detaljno je prikazan hidraulički proračun oluka i to za strešne oluke poluokruglog ili sličnog oblika, za razliku od oluka pravokutnog, trapezoidnog ili sličnog oblika poprečnog presjeka te posebno za ležeće oluke na ravnim krovovima. Za izračun dalje služe brojni dijagrami i tablice pa stoga ne čudi da su proizvođači oluka i razne opreme za odvodnju krovova, a za ispomoć projektantima, na svojim internetskim stranicama objavili prigodne programe za izračun potrebnog profila za oluke.

Problemu odvodnje ravnih krovova posvećeno je zasebno poglavlje u kojem se definira visina sloja vode kod kojeg nastupa prelijevanje u sigurnosni preljev. Pri tome je određeno da kod ravnih krovova s parapetima za svaku krovnu plohu moraju postojati minimalno dva odvoda od kojih jedan mora biti sigurnosni preljev jer je sigurnosni preljev obavezan. Za zelene krovove važno je spriječiti otjecanje otpadaka (lišća, trave i sl.) u sustav pomoću raznih rešetki i košara, pri čemu posljedično treba uzeti znatno smanjenje kapaciteta odvoda.

Svakako je potrebno ugraditi pristupačne revizije na dnu vertikala i na kritičnim točkama križanja. Također je potrebno povećati profil horizontalnih cijevi i cijevi na spoju s horizontalnim te prijelaz izvesti u blagom luku (npr. s dvostrukim koljenom) kako ne bi došlo do zarobljenog volumena zraka, što se može postići i ugradnjom posebnih uređaja (npr. Sovent račva i deaerator).

Oborinske vertikale nije dozvoljeno ugrađivati u konstruktivne elemente zgrade, a tamo gdje se mora voditi u servisnim oknima ili kanalima, moraju biti dostupne za servisiranje. Takve interne vertikale moraju biti sposobne prihvatiti opterećenje od nadvišenja sloja vode uslijed začepljenja cijevi.

Tablica za kapacitet vertikalnih kišnih vodova izrađena je prema Wyly – Eaton jednadžbi. Za usporedbu, prema ovoj tablici DN 150 može uz postotak ispunjenosti od 20% imati kapacitet od 13,7 l/s, dok prema DIN 1986 [2] limena vertikala istog profila ima kapacitet 13,3 l/s, što je vrlo slično. Kišni (krovni) odvodi obrađeni su još u jednoj normi HRN EN 1253 – Odvodi za zgrade [8] gdje se mogu naći još neke dodatne specifikacije.

Za sifonsku odvodnju, u Hrvatskoj nazvanu i podtlačnom, propisuje se minimalni profil cijevi 32 mm.

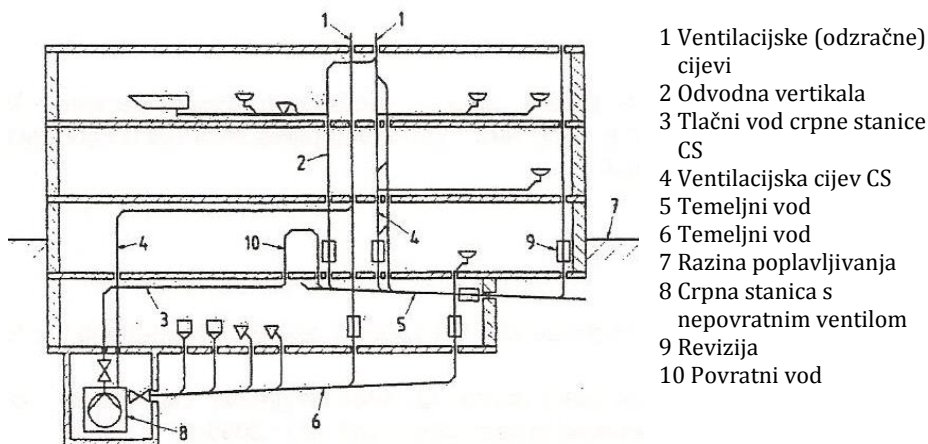
Kod spoja oborinske kanalizacije na sanitarnu, norma dozvoljava takvu izvedbu za manje površine u zgradi (izolirana manja površina krova, balkon) ako to lokalnim propisima nije zabranjeno, uz određene uvjete. U Anex-u A opisano je ispitivanje kapaciteta oluka i izljevni cijevi.

2.4. Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama - 4. dio: Postrojenja za dizanje otpadne vode - Nacrt i proračun (EN 12056 – 4 : 2000)

Crpne stanice u zgradama obrađene su detaljnije u još jednoj normi: HRN EN 12050 - Postrojenje za podizanje otpadnih voda za zgrade i terene [9], gdje je naglasak na način proizvodnje i tvorničko ispitivanje.

U normi HRN EN 12056 [1] se, pored predložka za hidraulički proračun za kućne crpne stanice, propisuju i obvezni uređaji i načini ugradnje za zaštitu od povratnog toka vode. Prostorije za smještaj crpnih stanica moraju biti dobro ventilirane s minimalno slobodnog prostora 60 cm oko i iznad postrojenja, cijevi dobro zvučno izolirane, a crpni bazen za fekalnu vodu mora biti slobodnostojeći.

Odzraka crpnog bazena mora se izvesti na krov, a moguće ju je spojiti na odzraku kućne kanalizacije (Slika 3).



Slika 3. Prikaz spoja crpne stanice za fekalne vode na vanjski kolektor [1].

Hidraulički proračun je dan detaljno uz sve potrebne formule, grafikone i tablice. Ograničenje brzine u tlačnom vodu je $0,7 \text{ ms}^{-1} < v < 2,3 \text{ ms}^{-1}$. Pri tome treba paziti da je prema normi HRN EN 1671 [10] potrebno postići minimalnu brzinu od $0,7 \text{ ms}^{-1}$ barem jednom u 24 sata. Volumen crpnog

bazena definiran je najmanjim radnim periodom, ali ne manje od volumena tlačnog voda, a minimalno 20 litara.

Normom su zadani obvezni periodi za inspekciju i održavanje:

- svaka 3 mjeseca za komercijalna postrojenja,
- svakih 6 mjeseci za višestambenu zgradu,
- svakih 12 mjeseci za obiteljske zgrade,

a navedene su obvezne radnje tijekom tog postupka u koje spada i ispiranje običnom vodom svake dvije godine.

2.5. Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama - 5. dio: Postavljanje i ispitivanje, upute za rad, održavanje i uporabu (EN 12056 – 5 : 2000)

Usprkos obećavajućem naslovu, osim vrlo općenitih natuknica, tekst ne donosi nikakve konkretne mjere niti izračune: treba voditi računa o tome da se cjevovod na odgovarajući način fiksira o konstrukciju, zaštiti od smrzavanja, ali i od termičkih deformacija. Treba provesti zaštitu od buke, ali i voditi računa da prodori cijevi kroz konstrukciju budu istog nivoa vatrootpornosti kao i sama konstrukcija.

Dio koji je trebao dati konkretan opis postupka za ispitivanje vodonepropusnosti, a koji je, na koncu, ono čime izvođač dokazuje da je uspješno izveo radove, nije naveden. Norma se poziva na lokalne propise ili zahtjeve navedene u projektnoj dokumentaciji ili ugovoru.

3. Usporedba sa starim normama, preporuke za korištenje, smjernice, popis nedostataka

Norma EN 12056 se pripremala 10 godina, upravo zbog mnogih različitih pristupa projektiranju i izvođenju kućne kanalizacije tako da primjena norme EN 12056 nije svugdje u EU bila jednako prihvaćena. U Njemačkoj su uočeni neki njeni nedostaci i dijelovi koji nisu do kraja definirani te je stara norma DIN 1986 [2] zadržana te se trenutno primjenjuje uz donošenje novog dijela [11], [12]:

- HRN EN 12056 Dio 1 do 5 [1] i
- DIN 1986 Dio 3, 4, 30 i 100 [2].

Na ovaj način je projektiranje otežano jer se moraju pratiti i nadopunjavati obje norme.

U UK je EN 12056 – Dio 2, prihvaćen uz nacionalni Anex (prije BS 5572), Dio 3 zamjenjuje staru BS 6367 [13]. Na mnoga pitanja na koje nova norma

ne daje odgovor traže se službeni odgovori nadležnih tijela kao što je CIPHE - Chartered Institution of Building Services Engineers (Ovlaštena institucija inženjera za instalacije u zgradama) tako da npr. umjesto standardnog intenziteta od 75 mm/sat, UK ima izrađenu kartu s intenzitetima za cijelo područje svoje države za odabrani povratni period od 5 godina (M5) i 2 minutno trajanje kiše. Smatra se da ovaj uvjet, uz sigurnosne preljeve, može zadovoljiti traženi povratni period od 100 godina za ravne krovove [7].

Nastavno na gore navedeno, a s obzirom da to norma nije definirala, i Hrvatska bi se trebala odlučiti o povratnom periodu potrebnom za hidraulički proračun te omogućiti projektantima javno dostupne podatke o intenzitetima na području cijele države. Za sada to ostaje na dugogodišnjem trudu projektanata oko sakupljanja podataka i informacija i osobno procjeni da se slijedi npr. njemačka norma kao nama tradicionalno najbliža.

Također je potrebno odlučiti koji je kućni kanalizacijski sustav od 4 ponuđena u normi kod nas najčešći jer se veličina DU može posljedično drastično promijeniti čime sustav može biti poddimenzioniran ili predimenzioniran.

Norma također ne govori o utjecaju drveća na uporabljivost oborinske odvodnje i na koji način moguća povećana prisutnost drveća u blizini može utjecati na protočnost sustava. Primjerice, neki američki propisi ne dozvoljavaju drveće viši od zgrade u blizini, a ako je to ipak slučaj, onda drveće mora biti udaljeno minimalno 6 m. Ovaj problem je možda moguće riješiti koristeći koeficijent za redukciju kapaciteta oluka, na primjer, umjesto 0,9 koristiti 0,8 ili manji.

Pitanje vrlo vrijednih građevina s ravnim krovom koje se osobito mora štititi od štete nastale plavljenjem moguće je možda riješiti u skladu s preporukom CIRIA - Construction Industry Research and Information Association (Udruženje za istraživanje i informacije u industriji izgradnje) kojom se smatra da su događaji koji se pojavljuju svakih 200 g. katastrofični (uragani, potresi) i da je PP200 (povratni period od 200 godina) potrebno koristiti samo kod izuzetno vrijednih građevina jer će u suprotnom i PP50 g. uz dogovarajuće sigurnosne faktore 2 ili 3 sasvim zadovoljiti [7].

Također je moguće na istoj zgradi koristiti različite povratne periode, npr. PP1 za vanjske oluke, a PP50 za ležeće oluke (rigole) na ravnom krovu s atikom. Vežano uz različite povratne periode, uvjeti za ravne krovove su se višestruko postrožili (PP100), a uvjeti za vanjsku odvodnju na parceli to nisu pratili pa je PP1 ili eventualno PP2. To je posljedica normativnog razdvajanja: za zgradu vrijedi HRN EN 12056 [1], a za parcelu tj. okoliš, parter vrijedi HRN EN 752 [14]. Ove dvije norme nemaju prave poveznice,

što hidrauličkim proračunom nije moguće uskladiti, a za projektanta ostaje da osmisli dobro tehničko objašnjenje [7].

Za zeleni krov moguće je koristiti preporuke njemačkog FLL - Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Njemačko društvo za istraživanje, razvoj i izgradnju krajobraza): za koeficijente otjecanja 0,1 – 0,7 , a za šljunkom prekrivene 0,8 [7].

4. Zaključak

Premda se norma EN 12056 pripremala 10 godina, nije ispunila mnoga očekivanja jer nije uspjela uključiti i pomiriti sve pristupe projektiranju i izvođenju kućne kanalizacije diljem EU pa se još uvijek paralelno koriste stare norme s manjim izmjenama.

Iako dosta opsežna, norma daje dojam da nije kontinuirane kvalitete jer u 3. dijelu do u detalje razrađuje vrlo precizne proračune za određivanje poprečnog profila oluka, dok u 5. dijelu vrlo površno prelazi preko važnih pitanja vezanih uz ispitivanje vodonepropusnosti i funkcioniranja cijelog sustava. Ipak, za područje u građevinarstvu vezano uz kućnu odvodnju u Hrvatskoj izuzetno je važno da konačno postoji regulativa koja može pomoći prilikom projektiranja i izvođenja.

Literatura

- [1] HRN EN 12056 : 2005 Gravitacijski odvodni sustavi u zgradama.
- [2] DIN 1986: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke (Kanalizacija zgrada i parcela) (1978.)
- [3] Tušar, B., *Kućna kanalizacija*, mtg – topgraf d.o.o., Velika Gorica, 2001.
- [4] HRN EN 752 : 2008 Odvodni i kanalizacijski sustavi izvan zgrada.
- [5] HRN EN 1610 : 2015 Polaganje i ispitivanje odvoda i kanalizacijskih cijevi.
- [6] Radonić, M., *Vodovod i kanalizacija u zgradama*. Croatiaknjiga, Zagreb, 2003.
- [7] Whorlow, B., Rainwater questions about Part 3 of BS EN 12056, www.cibse.org, (3.11.2015.).
- [8] HRN EN 1253-2:2015 Odvodi za zgrade -- 2. dio: Krovni odvodi i podni slivnici bez taložnica
- [9] HRN EN 12050 - Postrojenje za podizanje otpadnih voda za zgrade i terene
- [10] HRN EN 1671:2002 Tlačni kanalizacijski sustavi izvan građevina
- [11] Gabele, U., Dannemann, H.J., Zwei Normen – ein Anwendungsbereich, *IKZ – Haustechnik*, 18. 2006.
- [12] Sondergeld, K.D., Application of European and national standards in the Site drainage, *DWA Seminar*, Hamburg, 2003., www.bosy-online.de/din%20en%2012056.pdf (25.10.2015.).

- [13] Wise, A.F.E., Swaffield, J.A., *Water, Sanitary and waste Services for Buildings*, Butterworth - Heinemann, Woburn, 2002.
- [14] HRN EN 752:2008 Odvodni i kanalizacijski sustavi izvan zgrada

ANALIZA VODNOGA REŽIMA IZVORA KOŽLJAK I PLOMIN

WATER REGIME ANALYSIS OF KOŽLJAK AND PLOMIN SPRINGS

Lena Vozila*, Josip Rubinić**

Sažetak

Izvori Kožljak i Plomin dva su izvora s najmanjim izdašnostima koja se nalaze u sustavu Vodovoda Labin. Svrstavaju se u ocjedne izvore u flišu. U radu su sadržani rezultati provedenih analiza vodnoga režima promatrajući ukupne i crpljene protoke. Analizirani su podaci iz razdoblja 1998.-2014. Prema tim podacima ukupna srednja dnevna izdašnost izvora Kožljak varira u rasponu između 2,5 i 80,6 l/s, s prosjekom od 18,2 l/s, a izvora Plomin u rasponu između 1,2 i 43,8 l/s, s prosjekom od 17,6 l/s. Za vodoopskrbu se koriste sa srednjim godišnjim prosjekom od 13,0 l/s, kod izvora Kožljak te 5,2 l/s, kod izvora Plomin. Hidrološke obrade provedene su na godišnjoj, mjesečnoj te dnevnoj razini. Izvršena je usporedba s količinom palih oborina u cilju utvrđivanja ponašanja izdašnosti izvora. Analizirana su i recesijska razdoblja nekoliko najsušnijih godina u promatranom razdoblju. Rezultati regresijske analize pokazuju slične hidrološke karakteristike pražnjenja vodnih zaliha promatranih izvora. Visoka vrijednost koeficijenta korelacije ($k=0.91$) između srednjih godišnjih protoka izvora Kožljak i Plomin ukazuje na relativno čvrstu vezu njihovih vodnih režima.

Ključne riječi: izvori, Kožljak, Plomin, krivulje recesije, regresijska analiza

Abstract

Kožljak and Plomin springs are two springs with the lowest yields within the system operated by Vodovod Labin. They are classified as seepage flysch springs. The paper presents the results of the analysis of the water regime based on total and abstracted discharges. The analysed data are taken from the period 1998th-2014th. According to these data, the total mean daily yield of Kožljak spring varies between 2.5 and 80.6

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: lena.vozila@uniri.hr

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: jrubinic@uniri.hr

ls⁻¹, with an average of 18.2 ls⁻¹, while Plomin spring varies between 1.2 and 43.8 ls⁻¹ with an average of 17.6. ls⁻¹. They are used for water supply with mean annual average of 13.0 ls⁻¹ at Kožljak spring and 5.2 ls⁻¹ at Plomin spring. Hydrologic analyses were carried out on an annual, monthly and daily basis. Comparison with the quantity of rainfall was made in order to identify the behaviour of spring yields. The paper also analyses the recession periods of several driest years in the analysed period. The results of regression analysis show similar hydrological characteristics of the discharge of water resources of the analysed springs. A high value of the correlation coefficient ($k=0.91$) between the mean annual discharges of Kožljak and Plomin springs indicates a relatively strong correlation between their water regime.

Key words: *springs, Kožljak, Plomin, recession curves, regression analysis*

1. Uvod

U ovom radu analizirani izvori Kožljak i Plomin dva su najmanja izvora koji se nalaze u sustavu Vodovoda Labin, ali su zbog značajki njihovih voda vrlo važni za osiguranje stabilne vodoopskrbe područja Labinštine. U radu su izneseni rezultati provedene analize podataka o njihovim izdašnostima te zahvaćenim količinama vode koje se koriste u vodoopskrbi područja Labinštine. Prikazane su i informacije o položaju tih izvora te njihove opće i hidrološke karakteristike.

Provedene su analize na godišnjoj, mjesečnoj i dnevnoj razini diskretizacije. Ulazni podaci o izdašnosti te zahvaćenoj vodi uzeti su za razdoblje od 1998. do 2014. godine, dok su podaci o oborinama uzeti za razdoblje od 2000. (kad je Vodovod Labin uspostavio interna praćenja oborina na kišomjernoj postaji u Labinu) pa do 2014. godine.

2. Područje istraživanja

Prema geološkoj i geomorfološkoj strukturi istarski se poluotok dijeli na tri sasvim različite cjeline: Crvena, Bijela i Siva Istra. Otprilike četvrtinu poluotoka zauzima područje Sive odnosno flišne Istre, kojemu ujedno pripadaju i promatrani izvori Kožljak i Plomin [1]. Ti su izvori priključeni u vodoopskrbni sustav Vodovoda Labin (Slika 1) i imaju udio od 6% u ukupnim godišnjim količinama isporučene vode. Po kakvoći vode to su najbolji izvori sirove vode u tom sustavu. Osim navedenih, Vodovod Labin ima također koncesiju na crpljenje vode iz izvora Fonte Gaia, Kokoti, Mutvica i Sv. Anton [2]. Pri tome izvori Kožljak i Plomin pripadaju izvorima u flišu, a ostali spomenuti su izvori u kršu.



Slika 1. Vodoopskrbni sustav Vodovoda Labin d.o.o. (preuzeto iz arhiva Vodovoda Labin)

Brojni izvori različite, ali uglavnom relativno male izdašnosti javljaju se na kontaktu fliša i vodopropusnih vapnenačkih naslaga. Za razliku od krških izvora gdje je karakteristično brzo napajanje izvora tijekom kišnih razdoblja što uzrokuje i mutnoću vode, izvori na flišnim naslagama se ne napajaju trenutnim oborinama. Ti izvori, premda manjih izdašnosti, osiguravaju vodu s manjim sadržajima mutnoće [3].

Izvor Kožljak (g.š. $45^{\circ} 10' 30,84''$ N, g.d. $14^{\circ} 11' 26,01''$ E) smješten je na obronku Sisola - južnog planinskog nastavka Učke. Kaptiran je 1937. godine u vrijeme talijanske vlasti. Istječe na koti 277 m n.m. iznad sela Kožljak, uz Čepičko polje (nekadašnje Čepičko jezero). Vodom iz izvora se opskrbljuje područje Kožljaka, Čepića i Šušnjevice, a za vrijeme veće količine vode i dio Labina. Izvora u samom vodozahvatu zapravo ima šest, a raspoređeni su duž pedesetak metara podzemnog tunela. Izvor se odlikuje relativno manjom izdašnošću i usporenijim promjenama dinamike istjecanja. Vodovod Labin je 2001. godine dobio 20-godišnju koncesiju za iskorištavanje količine vode od 17 l/s. Kapacitet izvora iznosi između 2,5 l/s do prosječno 18,2 l/s dok je maksimalna izdašnost izvora oko 88 l/s. Glavno obilježje izvora Kožljak je vrlo dobra kakvoća vode, koja ostaje bistra i za vrijeme velikih kiša te stoga i nema potrebe za pročišćavanjem, već se voda jedino dezinficira jedino plinovitim klorom.

Izvor Plomin (g.š. $45^{\circ} 8' 22,65''$ N, g.d. $14^{\circ} 10' 45,83''$ E) smješten je u podnožju Plominske gore, u neposrednoj blizini naselja Plomin, 4,05 km

udaljen od prethodno spomenutog izvora Kožljak. Kaptiran je 1953. godine, od kada je i u eksploataciji. Nalazi se na 145 m n.v. iznad sela Malini. Izvor pripada slivu Boljunčice. Vodom iz izvora opskrbljuje se vodovodna mreža Plomina, Vidikovca, Brestove te Plomin Luke, kao dijelom i područje Kršana. Kao i izvor Kožljak, izvor Plomin se također svrstava se u tzv. ocjedne izvore locirane na kontaktu vodopropusnijih struktura i fliša koji nemaju neposredan kontakt s temeljnim krškim vodonosnikom [4]. Vodovod Labin je 2001. godine dobio 20-godišnju koncesiju za iskorištavanje količine vode od 16 l/s. Izvor se odlikuje relativno manjom izdašnošću i usporenijim promjenama dinamike istjecanja. Kapacitet tijekom godine iznosi od min. 1,0 l/s do prosječno 17,6 l/s, a maksimalna zabilježena protoka iznosi oko 44 l/s. Izvor je vrlo značajan upravo zbog vrlo dobre kakvoće vode te povoljnog visinskog položaja.

3. Podaci i metodologija

Analizirani i obrađeni podaci dobiveni su iz baze podataka Vodovoda Labin d.o.o. Podaci koji su korišteni u ovome radu proizašli su iz redovitih dnevnih mjerenja crpljenih količina i razina vode na izvoru na temelju kojih se, koristeći se konsumpcijskim krivuljama, u "Vodovodu Labin" obračunavaju prelivne, kao i ukupne protoke. Analizirani su svi raspoloživi dostupni podaci koji obuhvaćaju razdoblje 1998.-2014., što znači raspon od 16 godina. No, u tom odabranom razdoblju javljali su se određeni nedostaci podataka zbog kvara mjernog instrumenta za registraciju razine vode na izvoru. To se posebice odnosi na izdašnost izvora Kožljak tijekom 2012. godine, kada se vode podaci u najsušnijem ljetnom periodu do sada. Za to razdoblje su ukupne protoke uzete iste kao i za crpljene protoke zbog saznanja [5] da je protoka bila vrlo mala stoga se je crpila sva voda koja je bila na raspolaganju. Također, zbog nepreciznosti instrumenta, rezultati mjerenja nekad pokazuju da je količina zahvaćene vode veća od izdašnosti izvora, što je zapravo nemoguće, već su navedena odstupanja posljedica nedovoljno precizno definirane konsumpcijske krivulje. Stoga su u tim slučajevima ukupne protoke uzete iste kao crpljene protoke. To se događa u nekim slučajevima kada izdašnost izvora Kožljak padne ispod 17 l/s odnosno ispod 10 l/s kod izvora Plomin.

Pri provedenoj analizi podataka osnovni parametri su ukupne protoke i crpljene protoke [l/s]. Također, izvršena je i usporedba sa količinom palih oborina [mm]. Pri tome su korišteni podaci interne kišomjerne postaje Vodovoda Labin na lokalitetu Brdo kod Labina (g.š. 45° 5' 19,83" N, g.d. 14° 6' 55,25" E). Provedene su analize na godišnjoj, mjesečnoj i dnevnoj razini diskretizacije.

Uz standardne statističke postupke deskriptivne analize, provedene su i analize dnevnih protoka tijekom recesijskih razdoblja. Pri tome je u ovome radu, korišten izraz prema Maillet-u (1).

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (1)$$

U danoj Jednadžbi (1) pojedini parametri znače sljedeće:

- Q_0 - količina istjecanja na početku vremena t tijekom recesije [l/s]
- Q_t - količina istjecanja nakon vremena t [l/s]
- t - vrijeme proteklo između Q_0 i Q_t [dan]
- e - baza prirodnog logaritma
- α - koeficijent recesije (pražnjenja) [dan⁻¹]

Iz jednadžbe (1) slijedi koeficijent recesije α (2) [6].

$$\alpha = -\left(\frac{1}{t}\right) \cdot \ln\left(\frac{Q_t}{Q_0}\right) \quad (2)$$

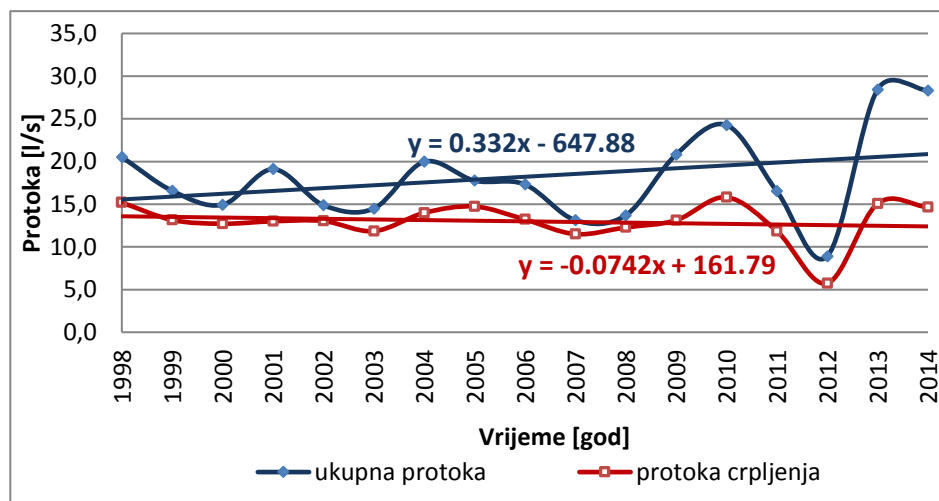
4. Analiza podataka

U Tablici 1 iznesene su vrijednosti osnovnih statističkih pokazatelja za promatrano razdoblje od 1998. do 2014. godine za oba izvora. Iz priloženog se vidi da srednja godišnja vrijednost ukupne protoke izvora Kožljak iznosi 18,2 l/s. Također, postoji visoka amplituda između minimalnih protoka koji se javljaju najčešće ljetnom periodu i onih maksimalnih koji su karakteristični za zimski period. Uspoređujući ukupne i crpljene protoke može se uočiti da su minimalne godišnje vrijednosti ukupnih i crpljenih protoka jednake ili približno jednake, dok su maksimalne godišnje vrijednosti ukupnih protoka puno veće od crpljenih protoka. Što se tiče izvora Plomin, srednja godišnja vrijednost ukupne protoke iznosi 17,6 l/s. U slučaju crpljenih protoka, srednja godišnja vrijednost je znatno manja u odnosu na izvor Kožljak.

Tablica 1. Srednji, minimalni i maksimalni godišnji podaci ukupnih i crpljenih protoka izvora Kožljak i Plomin u razdoblju 1998. - 2014.

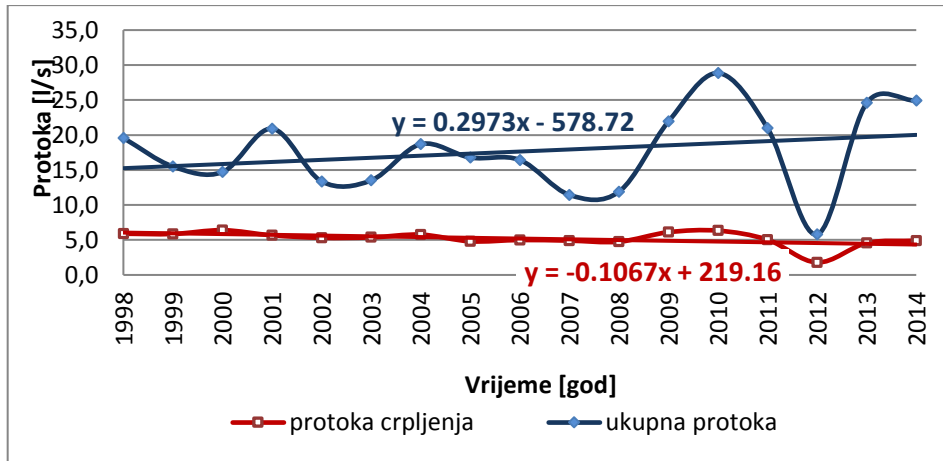
	KOŽLJAK						PLOMIN					
	ukupna protoka [l/s]			protoka crpljenja [l/s]			ukupna protoka [l/s]			protoka crpljenja [l/s]		
	SR _{UK}	MIN _{UK}	MAX _{UK}	SR _{CR}	MIN _{CR}	MAX _{CR}	SR _{UK}	MIN _{UK}	MAX _{UK}	SR _{CR}	MIN _{CR}	MAX _{CR}
SR	18.2	6.2	44.8	13.0	6.1	20.7	17.6	4.6	39.0	5.2	3.0	8.4
ST.DEV	5.2	1.8	15.9	2.3	1.7	2.4	5.8	1.9	5.5	1.1	1.2	1.1
Cv	0.29	0.29	0.36	0.17	0.27	0.12	0.33	0.41	0.14	0.20	0.39	0.13
MIN	8.9	2.5	30.9	5.7	2.5	17.1	5.8	1.0	28.3	1.8	0.0	5.8
MAX	28.4	10.4	87.9	15.8	9.3	28.3	28.8	10.3	43.8	6.4	5.0	11.4

Na Slici 2 prikazane su krivulje kretanja srednjih godišnjih ukupnih protoka i srednjih godišnjih crpljenih protoka za izvor Kožljak, a na Slici 3 za Plomin u razdoblju 1998.-2014. godine. Također, prikazani su i linearni trendovi. Iz priloženog se vidi da su se tijekom prošlosti događale određene oscilacije protoka, no najizraženije promjene kod oba parametra su se dogodile tek kasnije, u razdoblju 2010.-2013. godine. Po završetku 2010. godine ukupne protoke, a ujedno time i crpljene protoke karakterizira nagli pad. Godine 2012. dostižu minimum kada srednja vrijednost ukupne protoke pada ispod 10 l/s. Ta godina je ujedno i zapamćena po dugotrajnijoj suši koja je sa sobom donijela mnoge nepogodnosti, pa tako i redukciju vode I stupnja na prostor Istarske županije. Osim ekstremne suše, 2012. godina je također zapamćena po ekstremnijoj pojavi oborina od 1. studenog nadalje, stoga se pojavljuje nagli rast krivulja protoka. Unatoč određenim oscilacijama, ukupna protoka odražava trend rasta, dok crpljenja stagniraju.



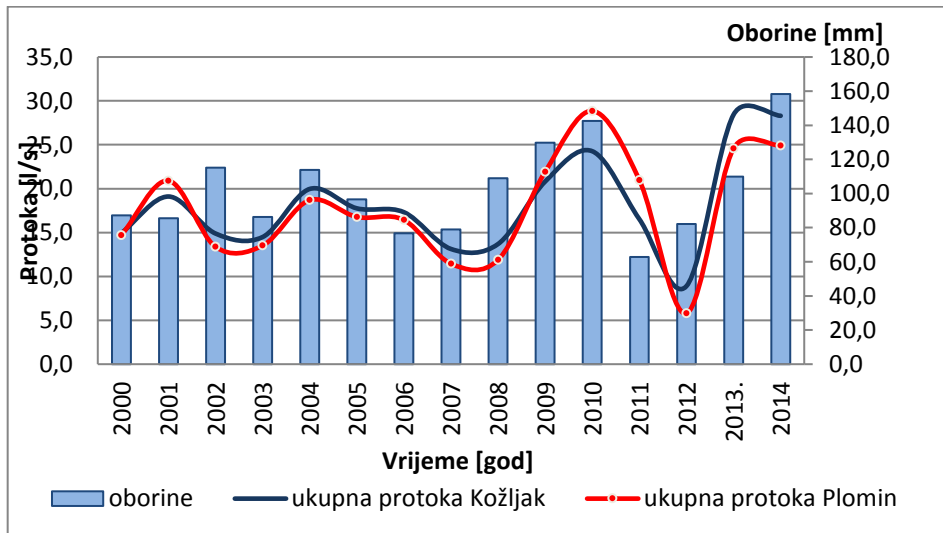
Slika 2. Usporedba srednjih godišnjih ukupnih i crpljenih protoka izvora Kožljak za period 1998. – 2014.

Na Slici 3 može se primijetiti kako je oblik krivulje kretanja srednjih ukupnih protoka vrlo sličan kao kod izvora Kožljak. Srednje godišnje vrijednosti protoke crpljenja se uglavnom kreću od 4,8 - 6,4 l/s te stoga nema nekih većih oscilacija (iznimka 2012.godina kada su izdašnosti bile toliko niske da se i nije moglo više crpiti). U ovom slučaju, isto kao i u prethodnom, najizraženije promjene kod oba parametra dogodile su se u razdoblju 2010.-2013. godine.



Slika 3. Usporedba srednjih godišnjih ukupnih i crpljenih protoka izvora Plomin za period 1998. - 2014.

Odnos srednjih godišnjih oborina i srednjih godišnjih ukupnih protoka oba izvora prikazan je na Slici 4. Može se uočiti kako rast, odnosno pad srednjih godišnjih oborina prate krivulje srednjih godišnjih ukupnih protoka izvora Kožljak i Plomin. Takvo slično ponašanje izdašnosti izvora Kožljak i Plomin možemo povezati s činjenicom da su izvori smješteni na terenima veoma sličnih hidrogeoloških značajki i relativno blisko tako da su pod djelovanjem istih klimatoloških prilika.



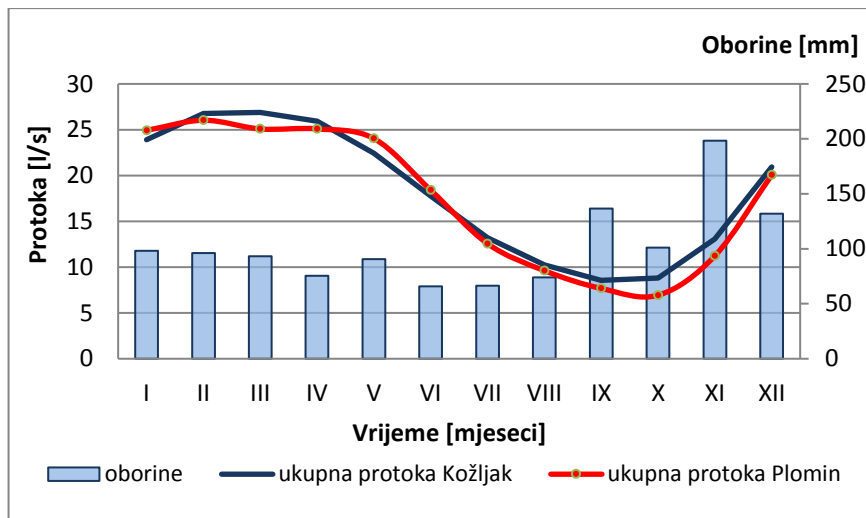
Slika 4. Usporedba srednjih godišnjih oborina i srednjih godišnjih ukupnih protoka izvora Kožljak i Plomin u razdoblju 2000. - 2014.

U Tablici 2 prikazane su unutargodišnje vrijednosti srednjih mjesečnih ukupnih protoka izvora Kožljak i Plomin za razdoblje od 1998. do 2014. godine.

Tablica 2. Unutargodišnje vrijednosti srednjih mjesečnih ukupnih protoka izvora Kožljak i Plomin za razdoblje od 1998. do 2014. godine

		KOŽLJAK												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	SR
SR		23.9	26.8	26.9	25.9	22.4	17.8	13.2	10.2	8.6	8.8	13.1	20.9	18.2
ST.DEV		12.6	17.9	15.1	12.4	7.4	6.1	4.1	2.9	1.9	4.8	9.3	13.8	9.0
KOEF.VAR		0.53	0.67	0.56	0.48	0.33	0.34	0.31	0.28	0.23	0.55	0.71	0.66	0.5
godina		2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2011	2011	-
MIN		5.0	4.5	4.5	3.9	3.6	3.7	2.7	2.5	3.8	3.6	5.5	5.3	4.0
godina		2010	2013	2013	2013	1999	2013	2010	2010	2010	1998	1998	2012	-
MAX		38.6	80.6	60.6	61.7	34.8	31.0	21.0	15.4	11.5	25.8	33.7	48.7	38.6
		PLOMIN												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	SR
SR		24.9	26.0	25.1	25.1	24.0	18.4	12.6	9.6	7.7	6.9	11.2	20.1	17.6
ST.DEV		15.3	14.3	13.8	11.6	10.2	8.2	5.3	4.5	4.7	4.6	10.3	13.4	9.7
KOEF.VAR		0.61	0.55	0.55	0.46	0.42	0.45	0.42	0.47	0.61	0.67	0.92	0.67	0.6
godina		2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2011	2011	-
MIN		3.0	2.4	2.1	1.7	1.4	1.4	1.2	1.2	1.4	1.2	3.4	3.4	2.0
godina		1998	2001	2009	2010	2010	2002	2010	2013	2013	1998	2014	2014	-
MAX		43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	40.5	26.8	22.6	19.0	19.2	35.6	41.6	35.3

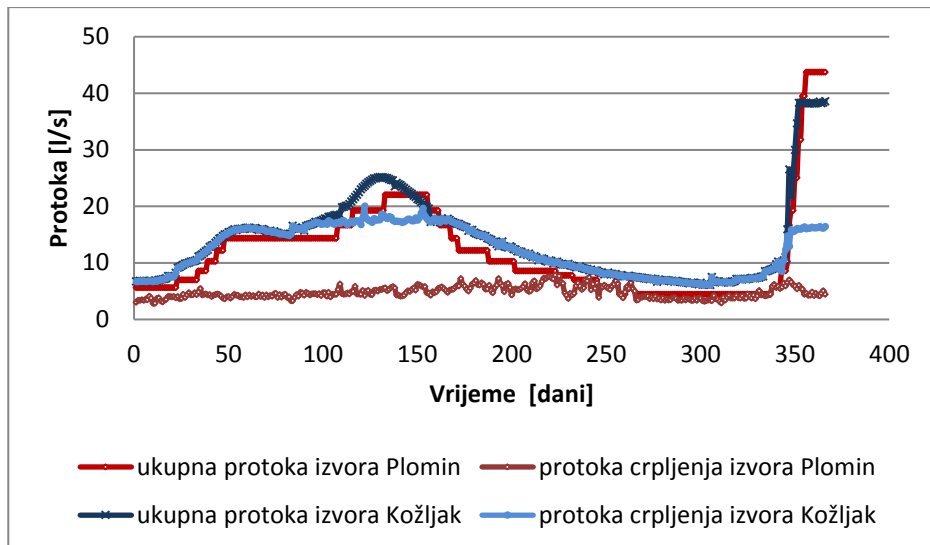
Na Slici 5 prikazan je usporedni odnos srednjih mjesečnih izdašnosti analiziranih izvora i palih oborina. Iz nje se može uočiti kako porastom oborina u razdoblju od IX do XII mjeseca započinje rast krivulje izdašnosti tek u XI mjesecu, dok svoj maksimum dostiže u razdoblju od I do IV mjeseca. Uočava se slično ponašanje vodnoga režima izvora Kožljak i Plomin, te njihove usporene reakcije na pale oborine, što je karakteristično za izvore u flišu.



Slika 5. Usporedba srednjih mjesečnih oborina i srednjih mjesečnih ukupnih protoka izvora Kožljak i Plomin u razdoblju 2000. - 2014.

U analizi dnevnih podataka odabrane su godine koje su karakteristične po najmanjoj i najvećoj izdašnosti izvora Kožljak i Plomin. Usporedno sa izdašnostima izvora prikazane su i krivulje zahvaćene količine vode.

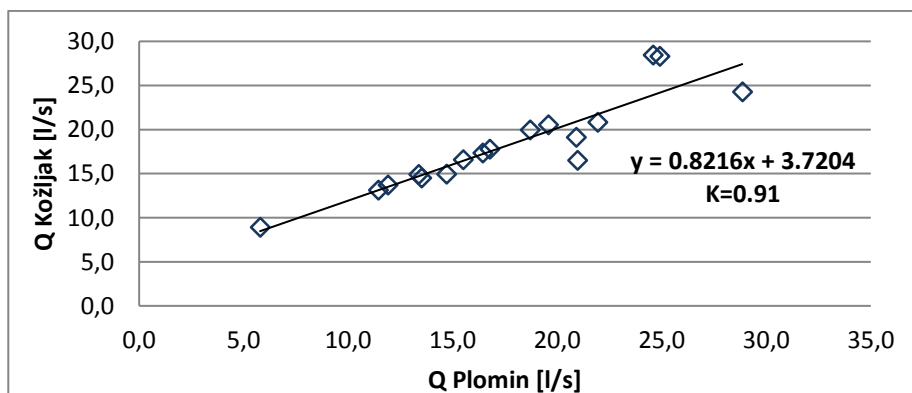
Kao godina s najmanjom izdašnošću analiziranih izvora izabrana je 2008. godina. Zapravo je 2012. godina bila najsušnija u promatranom razdoblju od 16 godina, ali zbog nedostatka podataka za veći dio godine, odabrana je 2008. godina sa srednjom godišnjom vrijednošću ukupne protoka izvora Kožljak od 13,7 l/s odnosno izvora Plomin od 11,9 l/s. Na Slici 6 prikazana je ukupna protoka zajedno sa protokom crpljenja za 2008. godinu. Prije svega može se uočiti da se tijekom većeg dijela godine ukupna protoka izvora Kožljak poklapa sa protokom crpljenja. To je stoga što se u ljetnim mjesecima, odnosno u mjesecima kada se pojavljuju minimalne vrijednosti protoka, crpi se sva voda koju izvor daje.



Slika 6. Krivulje ukupnih i crpljenih protoka izvora Kožljak i Plomin za 2008. godinu

Iz priloženog se vidi kako krivulje nemaju nagle i skokovite promjene kao kod krških izvora. Stoga slijedi da unatoč padalinama (koje ionako nisu bile intenzivne) nema većih promjena. Može se uočiti kako se izdašnost analiziranih izvora postepeno počinje povećavati sredinom IV mjeseca te dostiže maksimum od 25 l/s, što opet nije neka značajnija promjena. Nadalje, sredinom VI mjeseca započinje recesijsko razdoblje koje traje do početka XII mjeseca kada započinje intenzivnije prihranjivanje izvora.

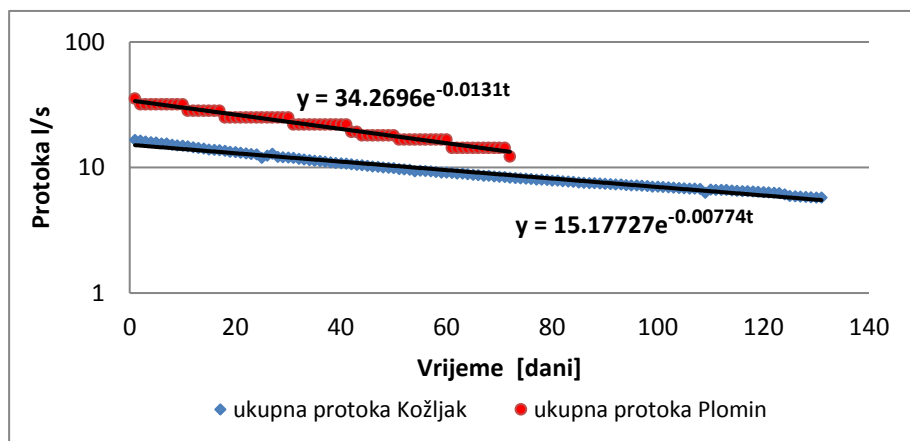
U cilju otkrivanja međuodnosa izdašnosti izvora Kožljak i Plomin provedena je regresijska analiza. Na temelju prethodno provedenih analiza pretpostavljeno je da postoji povezanost promatranih izvora (Slika 7).



Slika 7. Linearna regresijska ovisnost godišnjih srednjih vrijednosti ukupnih protoka izvora Kožljak i Plomin za period 1998. - 2014.

Po visokoj vrijednosti koeficijenta korelacije (0.91) proizlazi da postoji relativno čvrsta veza među podacima o izdašnosti analiziranih izvora.

Detaljnije je razmotreno i recesijsko razdoblje najsušnijih godina promatranog razdoblja 1998. - 2014., i to kod izvora Kožljak za 2008. godinu, a izvora Plomin za 2003. godinu (Slika 8). Analizom recesijskog razdoblja odnosno krivulje recesije te primjenom (1) dobivene su jednadžbe recesija analiziranih izvora.



Slika 8. Krivulja recesije izvora Kožljak za razdoblje 17.06. - 25.10.2008. odnosno izvora Plomin za razdoblje 25.02. - 07.05.2003

Ovom analizom dobivena je jednadžba recesije izvora Kožljak (3).

$$y = 15,17727 \cdot e^{-0,00774t} \quad (3)$$

gdje su y ukupni protoci, a t vrijeme izraženo danima.

Koeficijent recesije za ovo razdoblje iznosi $\alpha=0,00774$ dana⁻¹. Taj koeficijent nam služi za određivanje prognoze ponašanja izdašnosti izvora u slučaju daljnjeg izostanka oborine. Naime, ukoliko znamo vrijednost protoka zadnjeg dana promatranja recesijske analize možemo prognozirati vrijednost protoka za odabrana vremenska razdoblja unaprijed ukoliko se recesija nastavi.

Daljnjom analizom dobivena je i jednadžba recesije izvora Plomin (4).

$$y = 34,2696 \cdot e^{-0,0131t} \quad (4)$$

Koeficijent recesije za ovo recesijsko razdoblje iznosi $\alpha=0,0131$ dana⁻¹.

5. Zaključci

Nakon obrade i analize ulaznih podataka vidljivo je da izvori Kožljak i Plomin imaju slične hidrološke značajke. To bi podrazumijevalo naglašeno sušno razdoblje tijekom ljetnog perioda (srpanj-rujan), a često zahvaća i mjesec listopad. Što se tiče crpljenih protoka, izvor Plomin ima manji stupanj korištenja njegovih voda od Kožljaka. Razmatrajući dnevne analize mogu se uočiti osnovne karakteristike izvora na flišnom terenu. Krivulje protoka, čija kretanja nisu obilježena naglim padom ili rastom, ukazuju na polaganu infiltraciju voda u podzemlje što rezultira bistrom vodom čak i u slučajevima pojave velikih voda koje kod krških izvora izazivaju mutnoću vode. Izvori Kožljak i Plomin u vodnijim mjesecima pojedinih godina, odlikuju se visokom izdašnošću, ali zbog tehničkih mogućnosti samoga vodovoda i njegova zahvata, nije moguće zahvaćati veće količine vode od uobičajenih. U takvim slučajevima trebalo bi, uz prethodne detaljnije analize učestalosti i trajnosti protoka, poduzeti tehničke zahvate da se te veće količine vode mogu iskoristiti. Što se tiče monitoringa, nužno bi bilo i obnoviti konsumpcijske krivulje, posebice na izvoru Kožljak, kako bi se otklonile u danom radu utvrđene neusklađenosti između ukupnih i crpljenih količina protoka.

Zahvala. *Na pomoći pri istraživanju i izradi rada zahvaljujemo djelatnicima Vodovoda Labin d.o.o.*

Literatura

- [1] Krmac, D. (ur), *Na izvorima Istarskog vodovoda*, Istarska kulturna agencija, Pula – Buzet, 133 str., 2013.
- [2] www.vodovod-labin.hr/o-nama/povijest-tvrtke, pristupljeno 6/2015
- [3] istra.lzmk.hr/fliš, pristupljeno 6/2015
- [4] Rubinić, J., *Vodni resursi i značajke kopnenih voda Istre u sušnim razdobljima, hidrološka studija*, Knjiga 1, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, nepublicirano, 2005.
- [5] Igor Mileta, *Vodovod Labin d.o.o.*, usmeno priopćenje
- [6] Urumović, K., Duić, Ž., Hlevnjak, B., *Hidrogeološko značenje koeficijenta recesije na primjeru istarskih izvora*, str 25.-34., Zbornik radova RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu vol.21, 2009.

VARIJANTNA RJEŠENJA SANACIJE KLIZIŠTA GRADIŠĆE KRAJ SAMOBORA

VARIANT SOLUTIONS OF REMEDIATION WORKS ON GRADIŠĆE LANDSLIDE NEAR SAMOBOR

Sanja Dugonjić Jovančević*, Martina Vivoda Prodan*, Željko Arbanas*, Zvezdana Mitrić*

Sažetak

Klizište Gradišće se nalazi u naselju Gradišće, oko 3 km zapadno od grada Samobora, u Zagrebačkoj županiji. Predmetno klizište pokrenuto je sredinom travnja 2013. godine, nakon razdoblja nadprosječnih oborina i neuobičajeno velikih količina snijega u zimskom razdoblju, nakon kojeg je u kontinentalnom dijelu Hrvatske zabilježeno preko 900 pojava nestabilnosti. Klizište Gradišće predstavlja rotacijsko klizanje po dvije klizne plohe u inženjerskom tlu, uzrokovano kombinacijom hidroloških nepravilnosti, prisutnosti materijala srednje do niske plastičnosti i trošne, raspucane osnovne stijene. U sklopu istražnih radova provedena su istražna bušenja, detaljno inženjerskogeološko kartiranje i laboratorijsko ispitivanje uzoraka tla i trošne stijene. U geotehničkom smislu, predmetna lokacija sastoji se od pokrivača (nasip, koluvij, deluvij, trošni siltiti i šejlovi) koji ima značajke inženjerskog tla i osnovne stijene (siltiti i šejlovi) u podlozi. Prosječan nagib terena na dijelu padine na kojemu je nastalo klizište je 30°. Predmetno klizište se nalazi u gornjem dijelu padine, pri čemu je na lokalnoj cesti nastalo oštećenje uslijed denivelacije gornjeg dijela pokrenute mase po glavnoj pukotini. U radu je prikazan opis i nastanak klizišta Gradišće, rezultati provedenih istražnih radova te analize dvaju predloženih varijantnih rješenja sanacije klizišta: izvedbom armiranog nasipa u stopi klizišta i gabionskog potpornog zida ispod lokalne ceste te pilotske stijene kao drugog varijantnog rješenja.

Ključne riječi: rotacijsko klizište, sanacija klizišta, ekstremne oborine, armirano tlo, pilotska stijena

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

E-mail: {sanja.dugonjic, martina.vivoda, zeljko.arbanas}@gradri.uniri.hr, zmitric1@gmail.com

Abstract

Gradišće Landslide is located in Gradišće Village, about three kilometers west of the Samobor City, in Zagreb County. Investigated landslide occurred in the middle of April 2013, after an above average rainy period and a great amount of snow in winter period, after which more than 900 instabilities were recorded in the continental part of Croatia. The landslide presents rotational sliding, formed in engineering soil and caused by combination of unfavorable hydrological conditions, presence of intermediate and low plasticity materials and weathered bedrock. Field investigation included borehole drilling, detailed engineering-geological mapping and laboratory testing of samples taken from the residual soil and weathered rock mass material. Geotechnical profile on the location is formed from the cover layer with characteristics of engineering soil (filling material, colluvium, talus deposits, weathered siltstone and shales) and bedrock (siltstone and shales). Average slope angle of the terrain in landslide location is 30°. The instability was formed on the upper slope and was evidenced on the local road, damaged by the sliding mass denivelation along the main scarp. The paper presents description and genesis of Gradišće Landslide, results of the performed field investigation and analysis of two remediation measures solutions: reinforced soil - gabion retaining wall, and pile wall construction as the second variant solution.

Key words: *rotational landslide, remediation measures, engineering soil, extreme precipitation*

1. Uvod

Ekstremni vremenski uvjeti od prosinca 2012. do travnja 2013. godine doveli su do re(aktivacije) neuobičajeno velikog broja plitkih klizišta u kontinentalnom dijelu Hrvatske, pri čemu je Državna uprava za zaštitu i spašavanje (DUZS) registrirala više od 900 takvih događaja, od čega je 13 registrirano u Zagrebačkoj županiji površine 3060 km² [1]. Svojim geomorfološkim i strukturnim položajem kontinentalni dio Hrvatske pripada Panonskoj nizini, gdje su brežuljkasti dijelovi izgrađeni od pleistocenskih i neogenskih sedimenata (inženjersko tlo, meke stijene-čvrsto tlo, uglavnom lapori) koji su podložni razvoju malih (<10⁵ m³) površinskih do srednje plitkih klizišta (<20 m) [1]. Usprkos malom volumenu i veličini, klizišta na tom području uzrokuju značajna oštećenja na postojećoj infrastrukturi i objektima, pa često zahtijevaju određene mjere sanacije kako bi se zaustavio proces klizanja.

Predmetno klizište smješteno je u gornjem dijelu padine, pri čemu približna zračna udaljenost od vrha padine do dna klizišta iznosi 25 metara, a prosječni nagib terena na kojem je nastalo klizište je oko 30°. Razvojem glavne vlačne pukotine i denivelacijom pokrenutog kliznog tijela došlo je do oštećenja na prometnici koja prolazi kroz naselje Gradišće, kao i na putu koji se odvaja od predmetne ceste (Slika 1). Klizište je formirano unutar slojeva

materijala inženjerskog tla koje je nastalo kao rezultat fizičkog i mehaničkog trošenja stijenske mase u podlozi.



Slika 1. Klizište Gradišće neposredno nakon aktivacije: a) oštećenja na lokalnoj prometnici; b) naguravanje pokrenute klizne mase na put u središnjem dijelu klizišta; c) sekundarne vlačne i posmične pukotine u nožici klizišta (fotografije D. Udovič).

2. Prirodne značajke šireg područja

2.1. Geološka građa i seizmičnost

Geološkim kartiranjem na terenu te uvidom u Osnovnu geološku kartu M 1:100.000 [2], utvrđeno je da osnovnu stijenu na širem istraživanom području klizišta Gradišće čine pješčenjaci, šejlovi, siltiti i gips. Naslage permsko-trijaske starosti kontinuirano naliježu na karbonate srednjeg i gornjeg perma. U krovini permsko-trijaskih klastita nalaze se gornjotrijaski dolomiti, odvojeni diskordantnom geološkom granicom. Strukturno-geološka građa šire okolice istraživane lokacije je relativno složena, a karakterizirana je reversnim rasjedima, pružanja SZ-JI [3].

Naslage matične stijene u inženjerskom smislu predstavljaju čvrsto tlo-meku stijenu, a pokrivene su površinskim naslagama, koje na klizištu Gradišće sačinjavaju: antropogene naslage - nasipi (Q_{ut}), deluvijalne ili padinske naslage (Q_d) i koluvijalne naslage (Q_{ka}). Površinske naslage rezidualnog tla i potpuno do jako trošne stijene (Q^{et}), koluvijalne i deluvijalne naslage (Q_{ka}) i umjetne tvorevine-nasip (Q_{ut}) smatraju se pokrivačem, dok se svježi šejl s proslojcima pješčenjaka i slabo trošan silit smatraju matičnom stijenom, odnosno podlogom [3].

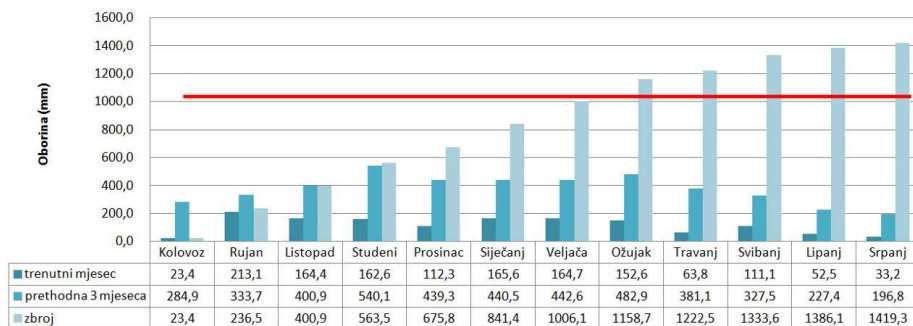
Seizmička aktivnost na području Grada Samobora je pojačana kao posljedica intenzivnih tektonskih pokreta u području planina Žumberka i Medvednice. Prema Karti potresnih područja Republike Hrvatske, poredbeno vršno ubrzanje tla za povratno razdoblje 95 godina iznosi $a=0,14g$, a za povratno razdoblje 475 godina $a=0,26g$ (gdje je $g=9.81 \text{ m/s}^2$) [4].

2.2. Hidrološki i hidrogeološki uvjeti

U bližoj okolici klizišta Gradišće nema pojava stalne površinske vode, a najbliži stalni vodotok je potok Ludvić koji nema utjecaja na klizište jer se nalazi oko 250 m zračne udaljenosti od klizišta, hipsometrijski stotinjak metara niže. Prilikom detaljnog inženjerskogeološkog kartiranja na istraživanoj lokaciji ustanovljena je samo jedna pojava većeg vlaženja u donjem lijevom dijelu klizišta. Tečenje oborinskih voda na lokaciji nije uređeno, pa se može zaključiti da se dio palih oborina infiltrira u teren, a dio slobodno otječe po kliznom tijelu.

Hidrogeološki uvjeti na području istraživanja uvjetovani su litološkom građom, strukturnim odnosima i stupnjem trošnosti. Matična stijena, pješčenjaci, šejovi i siliti perm-trijaske starosti su prema hidrogeološkim karakteristikama vodonepropusne naslage. Međutim, klizište Gradišće je formirano u površinskim naslagama koje, osim padinskih naslaga obuhvaćaju i potpuno do jako trošnu matičnu stijenu i rezidualno tlo. Visok stupanj raspucalosti i trošnosti površinskih naslaga uzrok je povećane propusnosti lokalnog karaktera.

Prilikom istražnog bušenja u kolovozu 2013. nije izmjerena pojava podzemne vode do dubine 15,0 m. U rujnu 2013. godine je u sve tri bušotine izmjerena razina podzemne vode, a vjerojatno je da je u trenutku nastanka klizanja, s obzirom na prethodne kumulativne oborine razina podzemne vode bila viša [3].



Slika 2. Mjesečne oborine za meteorološku stanicu Samobor za razdoblje od kolovoza 2012. do srpnja 2013. godine (crvena linija prikazuje prosječnu godišnju oborinu za razdoblje od 1981. do 2013) [3].

Iz podataka o oborinama mjenim na meteorološkoj postaji Samobor, za razdoblje od siječnja 1981. do srpnja 2013. godine (Slika 2), vidljivo je sljedeće: godišnja oborina varira u rasponu 619,20 – 1.403,20 mm/m²; prosječna godišnja oborina za razdoblje od 32 godine iznosi 1.009,4 mm/m²; ukupna oborina za 2012. godinu bila je 1.209,90 mm/m², a ukupna

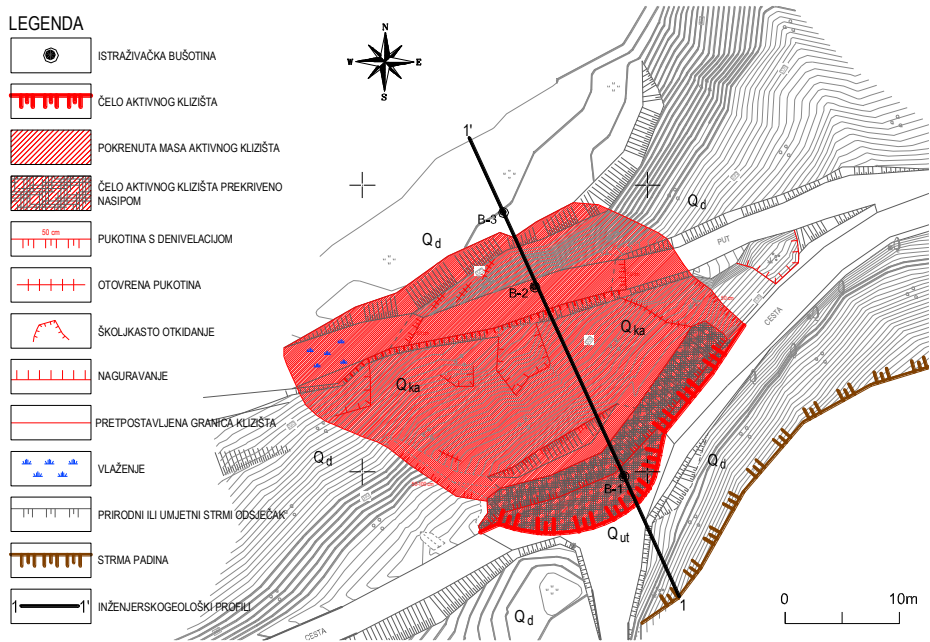
oborina od siječnja do srpnja 2013. godine je 743,5 mm/m². U razdoblju od 32 analizirane godine prosječne mjesečne oborine za tri mjeseca koji su prethodili aktiviranju klizišta sredinom travnja 2013., za mjesec siječanj, veljaču i ožujak 2013. godine bile su dva do tri puta veće od prosječne mjesečne oborine za navedene mjesece izračunate za razdoblje 1981.-2013. Tromjesečna kumulativna oborina koja je prethodila aktiviranju klizišta iznosila je 482,9 mm/m², što je gotovo pola prosječne godišnje oborine [3]. Navedeni podaci ukazuju na to da su mjesečne oborine na kraju 2012. i u prvom tromjesečju 2013. godine koje je prethodilo klizanju, bile znatno veće od prosječnih. Osim toga, zimsko razdoblje 2012/2013. karakterizirano je neuobičajeno velikim količinama snijega. Slični podaci ekstremnih vrijednosti palih oborina zabilježeni su i na području susjedne županije – Grada Zagreba, gdje je od 1. siječnja do 7. travnja 2013. kumulativna vrijednost tromjesečne oborine prešla 400mm (46% srednje godišnje oborine), a pri čemu je registrirano 55 događaja klizanja na 641 km² [1].

3. Geotehnički istražni radovi i značajke lokacije

Za potrebe utvrđivanja inženjerskogeoloških značajki i uvjeta terena, odnosno temeljnog tla na lokaciji klizišta Gradišće izvedeni su geotehnički istražni radovi. Geotehničke istražne radove proveo je Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, a rezultati istražnih radova prikazani su u Geotehničkom elaboratu [3]. Istražni radovi sastojali su se od detaljnog inženjerskogeološkog kartiranja, istražnog bušenja (tri bušotine, dubine 10-15 m), determinacije izbušene jezgre i laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla i stijene. Bušenjem je ustanovljen slabo trošan silt na dubini od 3,80 m, dok je svježa stijenska masa ustanovljena na dubini od 5,50 m, odnosno 9,60 m [3]. Inženjerskogeološko kartiranje izvršeno je na temelju snimljene geodetske podloge u mjerilu 1:200 iz kolovoza 2013. Također je obavljena inženjerskogeološka prospekcija šireg područja radi pojašnjenja geološke građe, pri čemu su izdvojeni osnovni litogenetski tipovi i locirani ožiljci koji su ukazivali na dimenzije klizišta i mehanizam pojave nestabilnosti (Slika 3).

Prilikom inženjerskogeološke determinacije i geomehaničke klasifikacije cjelokupne izbušene jezgre odabrano je ukupno 11 neporemećenih uzoraka tla i stijene za laboratorijsku obradu. Rezultati provedenih laboratorijskih ispitivanja, koja su uključivala klasifikacijska ispitivanja i određivanje granulometrijskog sastava, prikazani su u Tablici 1. Parametri temeljnog tla potrebni za analize stabilnosti i dimenzioniranje rješenja sanacije utvrđeni su na osnovu provedenih ispitivanja kao i

iskustva o parametrima čvrstoće tla sličnih materijala pokrivača i stijenske mase u podlozi na susjednim lokacijama [5].

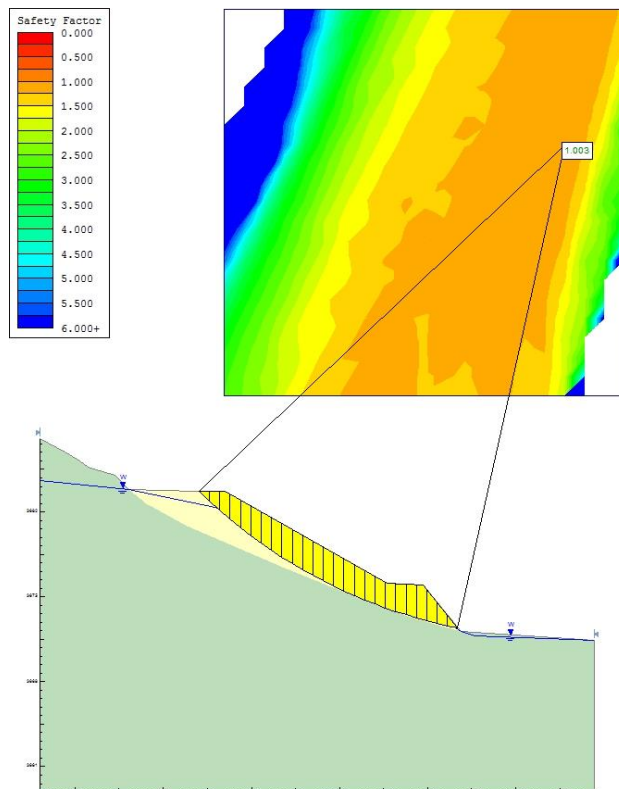


Slika 3. Detaljna inženjerskogeološka karta klizišta Gradišće: 1 istražna bušotina, 2 čelo aktivnog klizišta, 3 pokrenuta masa, 4 nasip u čelu nakon aktivacije, 5 pukotina s denivelacijom, 6 otvorena pukotina, 7 školjkasto otkidanje, 8 naguravanje, 9 pretpostavljena granica klizišta, 10 vlaženje, 11 prirodni ili umjetni strmi odsječak (prema [3])

Tablica 1. Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava materijala tla [3].

Buš.	Dubina [m]	Prirodna vlažnost	Granice plastičnosti			Indeks plast.	Indeks konz.	Granulometrijski sastav				Simbol
		w ₀ [%]	w _l [%]	w _p [%]	I _p [%]	I _c	G [%]	S [%]	M [%]	C [%]		
B-1	2,7-2,9	22,77	36,77	20,38	0,85	16,39	5,00	34,30	36,30	24,40	CI	
B-1	8,4-8,65	17,69	34,97	20,59	1,20	14,38	4,90	21,00	50,70	23,40	CL	
B-1	11,8-12,0	15,03	28,47	17,79	1,26	10,68	4,00	29,10	45,60	21,20	CL	
B-2	2,0-2,3	23,12	31,42	20,30	0,75	11,12	11,10	16,80	50,30	21,80	CL	
B-2	5,0-5,25	18,85	27,76	19,32	1,06	8,44	23,80	18,80	44,10	13,30	CL	
B-2	7,0-7,25	16,04	38,34	21,75	1,34	16,59	9,20	22,20	45,70	22,90	CL	
B-3	1,6-1,8	21,74	43,24	24,04	1,12	19,20	9,80	18,30	43,70	28,10	CI	
B-3	3,0-3,2	16,44	37,37	19,65	1,18	17,72	5,80	28,30	39,90	25,90	CI	

Dimenzije klizišta prema preporukama IAEG Commission of Landslides [6] su slijedeće: ukupna duljina klizišta $L = 28$ m, širina pokrenute mase $W_d = 33$ m, dubina klizne plohe=dubina pokrenute mase $D_r = D_d = 4$ m.



Slika 4. Kritična klizna ploha za povratne geostatičke analize [5]

Na osnovi rezultata istražnih radova ustanovljeno je da je klizište nastalo uslijed djelovanja različitih faktora koji su padinu doveli u stanje granične ravnoteže: materijali srednje do niske plastičnosti (CI/CL); trošni i raspucani materijali matične stijene; kritična kumulativna oborina; topljenje snježnog pokrivača; porast razine podzemne vode u padini te zasijecanje u dnu padine koji su prethodili klizanju. Povratnim geostatičkim analizama (Slika 4) te koristeći iskustava o parametrima čvrstoće tla u sličnim materijalima utvrđeni su slijedeći parametri čvrstoće pokrivača i osnovne stijenske mase za koje geometrija klizne plohe odgovara stanju na terenu:

Pokrivač:	zapremninska težina	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
	kut trenja	$\phi = 20^\circ$
	kohezija	$c = 6 \text{ kPa}$
Osnovna stijenska masa:	zapremninska težina	$\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$
	kut trenja	$\phi = 35^\circ$
	kohezija	$c = 20 \text{ kPa}$

Analizama je dobivena je kritična klizna ploha koja položajno odgovara uočenim tragovima nestabilnosti u kruni i stopi klizišta. Dobivenim faktorom sigurnosti koji je na granici stabilnosti ($F_s=1,0$) bila je očekivana pojava nestabilnosti već pri manjim poremećajima hidrodinamičkih uvjeta i promjenama geometrije padine. Rotacijsko klizanje se dogodilo u deluvijalnim naslagama i rezidualnom tlu matične stijene siltita/šejla.

4. Analize varijantnih rješenja sanacije klizišta

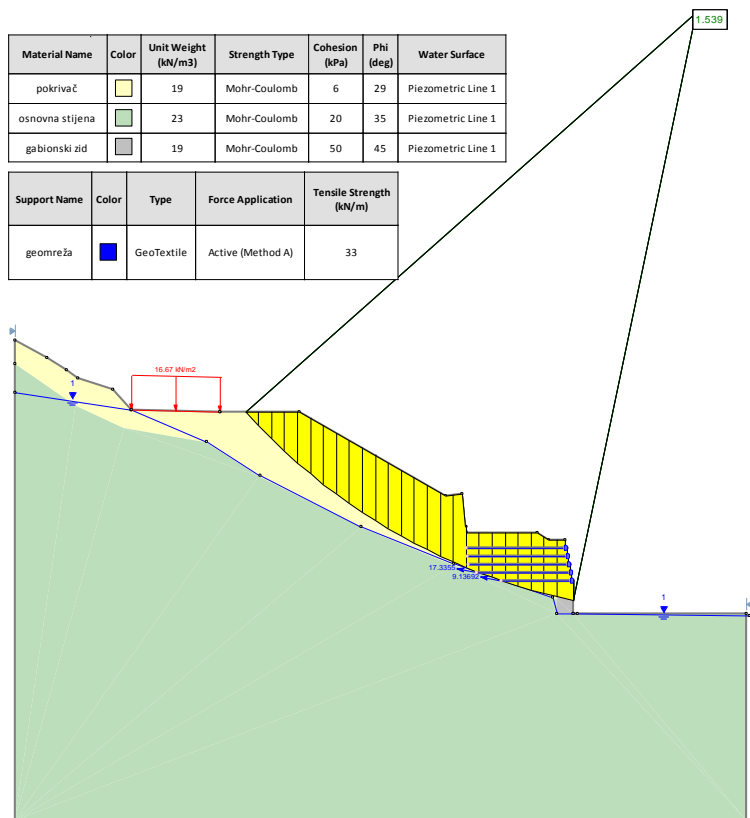
Za potrebe sanacije istraženog klizišta razmotrene su moguće mjere sanacije klizišta zasnovane na geometriji klizišta, uzorcima nastanka klizišta kao uvjetima na lokaciji u smislu mogućnosti gradnje i pristupa građevinske mehanizacije samoj lokaciji izvedbe sanacijskih mjera. U konačnici su razmotrene dvije varijante sanacije i to prvim varijantnim rješenjem sanacija klizišta izvedbom armiranog nasipa i ugradnjom samobušivih drenova duljine 8,0 do 10,0 m u dnu padine te gabionskog potpornog zida visine 2,0m i kopanih drenova na razmaku 6,0 m ispod lokalne prometnice [5]. Drugom varijantom sanacije klizišta predlaže se izvedba pilotske stijene od jednog reda armiranobetonskih bušenih pilota, duljine 7,50 m, površine poprečnog presjeka 80,0 cm, na osnom razmaku 100 cm u ukupnoj dužini od približno 46,00 m, jednog reda samobušivih geotehničkih sidara nosivosti $N=500 \text{ kN}$ [7].

U svrhu provjere zadovoljavanja tražene stabilnosti sanirane padine za varijantna rješenja sanacije klizišta, provedene su geostatičke analize stabilnosti padine programskim paketom Rocscience, programom Slide, Version 6.032, Rocscience Inc. Toronto, Canada. Proračun stabilnosti proveden je metodom po Bishopu, Janbuu i Spenceru za kružne klizne plohe.

4.1. Izvedba armiranog nasipa i gabionskog zida

Provedenom analizom stabilnosti za prvu varijantu sanacije klizišta izvedbom nasipa od armiranog tla u nožici padine dobiven je zadovoljavajući faktor sigurnosti, $F_s=1,539$ (Slika 5) koji ukazuje na činjenicu da bi se predloženim mjerama stabilnosti osiguralo zaustavljanje klizanja i postizanje zadovoljavajućeg stanja stabilnosti sanirane padine.

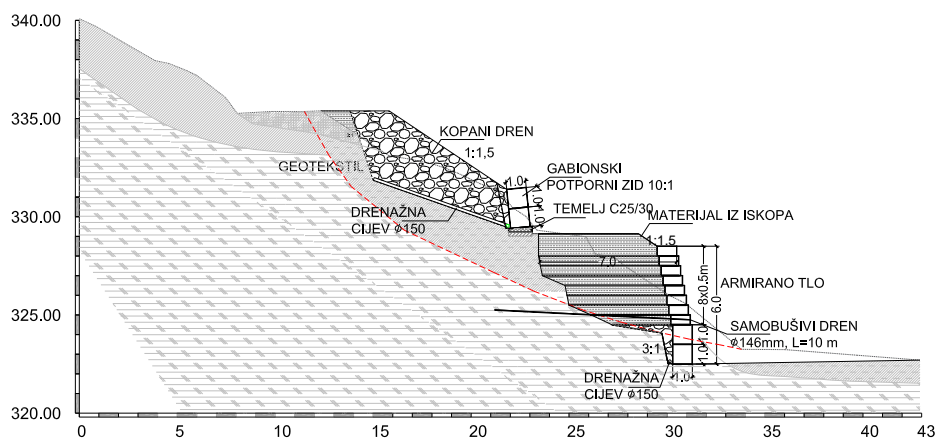
U ovoj varijanti sanacije klizišta radovi započinju iskopom materijala u dnu padine u odsječcima od 6,0 m, nakon čega slijedi izvedba armiranog nasipa. Dno armiranog nasipa sastoji se od gabionskih koševa visine 2,0 m, iza kojih se izvodi kameni nasip od materijala iz iskopa ili okolnog pozajmišta. Iza gabionskog zida izvedenog u radnim odsječcima od 6,0 m slažu se drenažne cijevi $\varnothing 150$ mm. Nakon toga slijedi formiranje lica nasipa od gabionskih koševa, paralelno s polaganjem geomreža u zaleđu koševa u duljini 5,0-7,0 m.



Slika 5. Kritična klizna ploha za varijantno rješenje sanacije klizišta nasipom od armiranog tla u stopi klizišta

Izvedba prednjeg lica zida od gabionskih koševa, nasip i polaganje geomreže izvodi se na svakih 0,50 metara visine. Sniženje razine podzemne vode unutar armiranog nasipa predviđeno je izvedbom samobušivih drenova promjera $\varnothing 146$ mm, duljine $L=8.0-10.0$ m, na međusobnom razmaku od 4,0 m, s nagibom 5% prema dolje. U nastavku armiranog nasipa izvodi se zamjena postojećeg nasipa trupa ceste u širini od 2,0 m, miješanim

ili čistim kamenim materijalom u nagibu 1:1,5 položenim na geotekstil. Gabionski potporni zid visine 2,0 m izvodi se po rubu lokalne prometnice, u srednjem dijelu padine, na podložnom betonu debljine 20 cm i armiranobetonskom temelju visine 30 cm. Pri izvedbi gabionskog zida koriste se dimenzije košara 2,0 x 1,0 x 1,0 m i 2,0 x 1,0 x 0,5 m. Nakon polaganja geotekstila na dno i bokove iskopa, u svrhu sprječavanja miješanja kamenog i zemljanog materijala te filtriranja i odvodnje voda na kontaktu, iza gabionskog zida polaže se drenažna cijev $\varnothing 150$ mm. Paralelno s pružanjem padine predviđena je izvedba kopanih drenova duljine 7,0-9,0 m na razmaku od 6,0 m. Kopani drenovi se izvode do sloja trošne stijenske podloge, prosječne dubine 4,0 m i širine kanala 1,0 m, u koji se polaže drenažna cijev $\varnothing 150$ mm i zatrpava čistim drobljenim kamenim materijalom granulacije 0-100 mm [5]. Karakteristični poprečni presjek za opisane mjere sanacije klizišta nasipom od armiranog tla u stopi klizišta prikazan je na Slici 6.



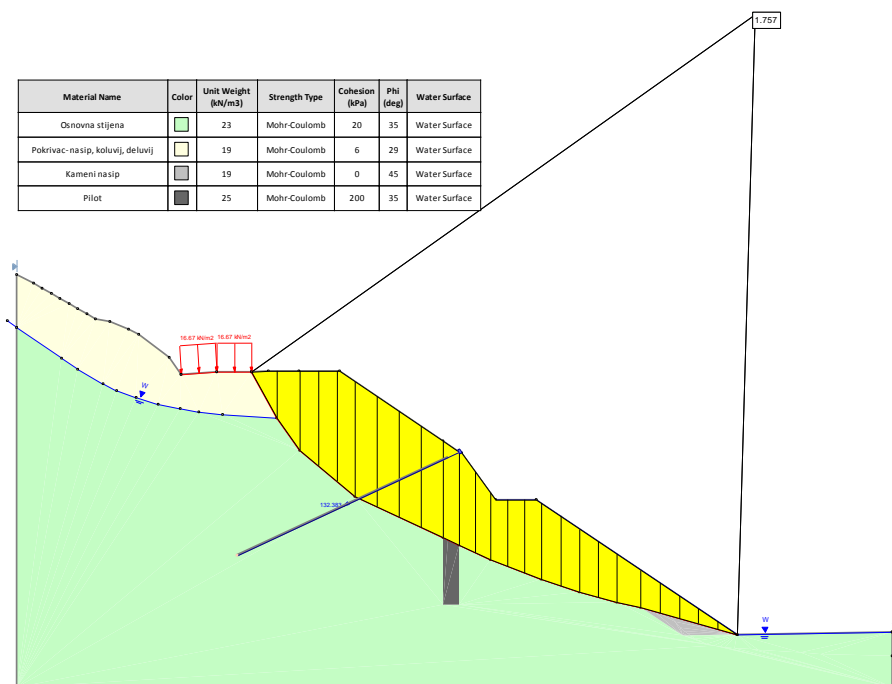
Slika 6. Karakteristični poprečni presjek za varijantno rješenje sanacije klizišta nasipom od armiranog tla u stopi klizišta [5]

4.2. Izvedba pilotske stijene

Proračunom za drugo varijantno rješenje, izvedbe pilotske stijene, kamenog nasipa i kopanih drenova dobiven je faktor sigurnosti $F_s=1,757$ koji također zadovoljava zahtjeve stabilnosti saniranog klizišta (Slika 7). Položaj pilotske stijene odabran je iznad postojećeg puta preko kliznog tijela. Sve ostale pozicije pilotske stijene ne omogućuju pristup bušače garniture bez dodatnog ugrožavanja stabilnosti padine.

Sanacija klizišta prema varijantnom rješenju, izvedbom pilotske stijene, započinje širokim iskopom materijala u području pilotske stijene do kote

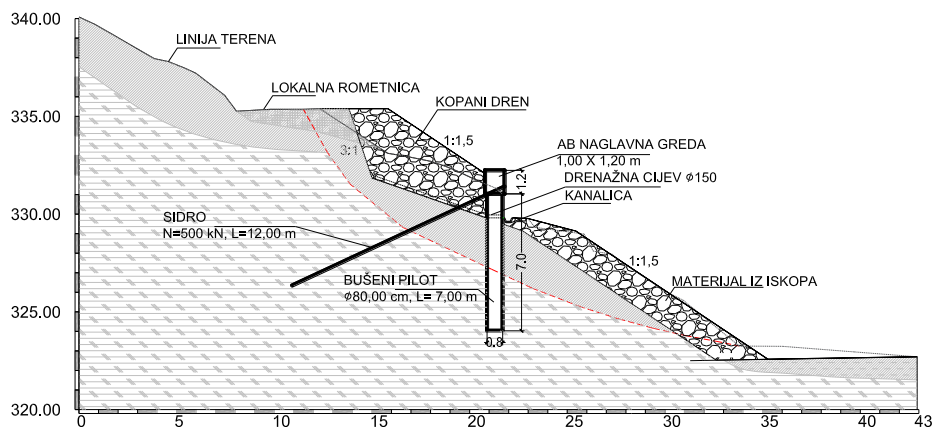
buduće armiranobetonske grede, nakon čega slijedi izvedba bušenih pilota. Predviđeni su bušeni piloti promjera 80 cm i duljine 7,50 m na osnom razmaku 100 cm uz uvjet ulaska baze pilota u čvrstu stijensku podlogu minimalno 3,00 m. Betoniranje pilota se izvodi nakon postavljanja armaturnog koša u neprekidnom radu po cijeloj dužini, uz obaveznu uporabu kontraktor postupka, betonom razreda tlačne čvrstoće C25/30. Nakon uklanjanja površinskog (nečistog) sloja pilota obijanjem glave pilota, piloti se povezuju u cjelinu armiranobetonskom naglavnom gredom dimenzija 1,00 x 1,20 m od betona razreda tlačne čvrstoće C 30/37.



Slika 7. Kritična klizna ploha za varijantno rješenje sanacije klizišta izvedbom pilotske stijene [7]

Pilotska stijena se dodatno ojačava samobušivim geotehničkim sidrima nosivosti $N=500$ kN i duljine $L=12,00$ m, na razmaku od 2,50 m, pod kutem od 25° u odnosu na horizontalu. Pri izvođenju samobušivih geotehničkih sidara potrebno je osigurati da sidro bude injektirano po cijeloj dužini. Predviđena je i izvedba pet kopanih drenova ispred pilotske stijene, na međusobnom razmaku od 6,00 m. Drenovi se kopaju u smjeru pružanja padine do sloja trošnih siltita i šejlova. Predviđena širina kanala za pojedini dren iznosi 1,00 m. Na dno i bokove iskopa polaže se geotekstil, a zatim se dno iskopa zatrpava drobljenim kamenim materijalom granulacije 0-4 mm u visini od 20 cm. Na ovako uređeno tlo polaže se drenažna cijev $\varnothing 150$ mm

koja se zatrpava čistim drobljenim kamenim materijalom granulacije 0-60 mm do 1,0 m ispod površine terena. Iza pilotske stijene izvodi se zamjena postojećeg materijala nasipom od miješanog ili čistog kamenog materijala u nagibu 1:1,5, sve do potrebne visine terena. Radovi obuhvaćaju i ugradnju betonskih kanalicā po uređenoj padini za odvodnju površinske vode [7]. Slika 8 prikazuje navedene mjere sanacije varijantnog rješenja sanacije klizišta izvedbom pilotske stijene.



Slika 8. Karakteristični poprečni presjek za varijantno rješenje sanacije klizišta izvedbom pilotske stijene [7]

4.3. Analiza troškova predviđenih radova za varijantna rješenja

U proračun troškova uzete su cijene pojedinih stavki radova prema sadašnjim cijenama izvođenja radova na tržištu. Analiza izvedbe varijantnih rješenja pokazala je da troškovi izvedbe sanacije u varijanti izvedbe armiranog nasipa u stopi klizišta u kombinaciji s gabionskim zidom iznose oko 30% troškova sanacije klizišta izvedbom pilotske stijene (Tablica 2). Budući da obje analizirane varijante sanacije osiguravaju tražene vrijednosti faktora sigurnosti stabilizirane padine, kao optimalna varijanta nameće se varijanta sanacije izvedbe armiranog nasipa u stopi klizišta u kombinaciji s gabionskim zidom uz rub prometnice.

Tablica 2. Rezultati analiza troškova izvedbe varijantnih rješenja

Varijantno rješenje	Ukupni troškovi (kn)
Armirani nasip i gabionski zid	423.750,00
Pilotska stijena	1.559.000,00

5. Diskusija i zaključak

Rotacijsko klizište Gradišće rezultat je djelovanja različitih nepovoljnih faktora i pokretača klizanja. Nadprosječna količina oborina u tromjesečnom periodu koje je prethodilo klizanju, s relativno visokim mjesečnim količinama oborina u istom razdoblju, uz topljenje većih količina snijega na lokaciji, imala najveći utjecaj na podizanje razine podzemne vode, povećanje pornih pritisaka i smanjenje čvrstoće materijala u padini, a time i na pokretanje klizišta. U istom je razdoblju u kontinentalnom dijelu Hrvatske na području sedam županija pokrenuto i registrirano preko 900 sličnih događaja klizanja pokrenutih natprosječnim količinama oborina krajem 2012. i početkom 2013. godine koje predstavljaju jedinstven događaj u zadnjih 150 godina [1]. Brojna klizišta na spomenutom području uzrokovala su posljedice i zahtijevala provedbu odgovarajućih mjera sanacije u cilju zaustavljanja klizanja.

Analize stabilnosti provedene su za dva varijantna rješenja sanacije klizišta Gradišće: izvedbu armiranog nasipa u stopi klizišta i s gabionskim potpornim zidom uz prometnicu i izvedbu pilotske stijene u središnjem dijelu klizišta. Rezultati analiza su pokazali da je faktor sigurnosti, dobiven za oba analizirana rješenja, zadovoljavajući. U radu su prikazani radovi koje bi obuhvatilo pojedino rješenje sanacije, kao i troškovi izvedbe. Analiza troškova izvedbe predloženih rješenja pokazala je da je rješenje sanacije u varijanti izvedbe armiranog nasipa u stopi klizišta u kombinaciji s gabionskim zidom iznosi oko 30% troškova sanacije klizišta izvedbom pilotske stijene. Budući da obje analizirane varijante sanacije osiguravaju tražene vrijednosti faktora sigurnosti stabilizirane padine, kao optimalna varijanta nameće se varijanta sanacije izvedbe armiranog nasipa u stopi klizišta u kombinaciji s gabionskim zidom uz rub prometnice.

Literatura

- [1] Bernat S., Mihalić Arbanas S., Krkač M. (2015): Landslides Triggered in the Continental Part of Croatia by Extreme Precipitation in 2013, XII IAEG Congress 'Engineering Geology for Society and Territory', At Torino, Italy, Volume 2, DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3_284, pp 1599-1603.
- [2] Šikić D. Polšak A., Magaš N. (1972): *Osnovna geološka karta*, list Zagreb mjerila 1:100.000. Institut za geološka istraživanja Zagreb.
- [3] Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu (2013) Geotehnički elaborat klizišta Gradišće.
- [4] Prirodoslovno matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Geofizički odsjek, Karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratno razdoblje 95 i 475 godina (2012), <http://seizkarta.gfz.hr/> [Ožujak, 2016]

- [5] Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci (2013) Klizište u naselju Gradišće, Samobor, Glavni građevinski projekt sanacije. Elaborat broj: 361-08/13-01/26, 2170-57-05-13-2
- [6] IAEG (1990) Suggested Nomenclature for Landslides, Bulletin IAEG, 41, 13-16.
- [7] Mitrić Z. (2014) *Sanacija klizišta Gradišće*, Samobor, Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE POSMIČNOG PONAŠANJA KRUPNOZRNATIH TALA

EXPERIMENTAL RESEARCH ON SHEAR BEHAVIOUR OF COARSE-GRAINED SOILS

Ugo Puniš**, Vedran Jagodnik*

Sažetak

Pri izgradnji različitih nasipa, poboljšavanju svojstava temeljnog tla i temeljenja široku upotrebu imaju heterogeni nekoherentni zrnati materijali sa značajnim udjelom šljunka. Kako bi se takvi materijali mogli koristiti u praksi, potrebno je poznavati njihovo posmično ponašanje i deformabilnost

Kako bi se istražilo ponašanje krupnozrnatog materijala, provedeno je ukupno 15 ispitivanja u uređaju za izravno smicanje sa smičnim okvirom dimenzija 300 x 300 mm na šljunku, pijesku i njihovim mješavinama. Cilj rada je istražiti i pokazati posmično ponašanje šljunka, pijeska i njihovih mješavina te utvrditi postoji li tendencija dilatiranja. Ispitano je pet kombinacija mješavina, svaka na tri različita vertikalna naprezanja. Kao rezultati pokusa dobiveni su minimalni, maksimalni i kritični koeficijenti pora, normalizirane krivulje naprezanja, normalne konsolidacijske linije i linije kritičnih stanja, vršni i kritični kut trenja te kut dilatancije.

Uređaj za izravno smicanje koji je korišten prilikom provedbe pokusa je jedan od rijetkih uređaja u Hrvatskoj i šire što je omogućeno uz pomoć EU fonda iz Projekta „Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci“.

Ključne riječi: *krupnozrnati materijal, direktno smicanje, dilatancija, kut trenja, eksperiment*

Abstract

Heterogenous, non-cohesive materials with significant amount of gravel have a wide use in construction of embankments and in soil foundation improvement. Understanding their shear behavior and deformability is essential to the use of these materials in practice.

**E-mail: ugotpunis@gmail.com

*Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3

E-mail: vedran.jagodnik@gradri.hr

To investigate the behavior of coarse-grained materials, a total of 15 direct shear tests on a large direct shear apparatus with box dimensions of 300 x 300 mm have been performed on gravel, sand and mixtures of gravel and sand. The focus of this paper is to present the shear behavior of stated material and whether it has tendency to dilate. Five series of tests were conducted on different sand-gravel mixtures. Each of the series has been tested on three different vertical stress levels. Test results consist of minimal, maximal and critical void ratio, normalized stress-strain curves, normal consolidation lines and critical state lines, peak and critical friction angles and dilatancy angle.

Large direct shear apparatus used in these tests is one of rarest in Croatia and wider which usage has been made possible with the help of EU fond Project „Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci“.

Key words: *coarse-grained material, direct shear, dilatancy, friction angle, experimental*

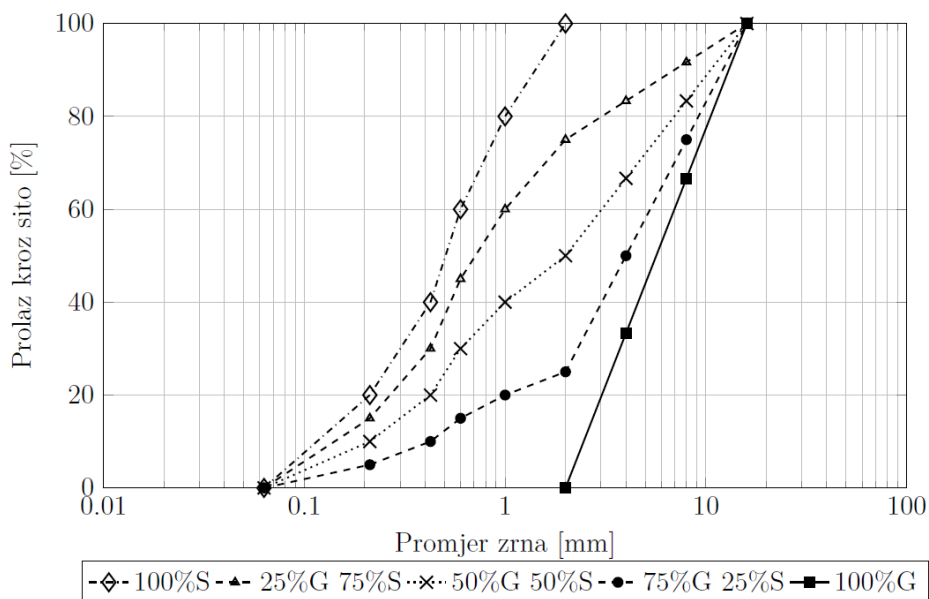
1. Uvod

Laboratorijska ispitivanja smicanja krupnozrnatih materijala većih od 2 mm mogu predstavljati problem zbog malih dimenzija uređaja za izravni posmik (pri ispitivanju se najviše koristi okvir dimenzija 60 x 60 mm). Maksimalna veličina zrna koja se može ispitati u uređaju za izravno smicanje rijetko kada prelazi 10 mm pa je često potrebno ograničiti ispitivanja samo na pijesak. Kao jedan od načina kojim se navedeni problem može riješiti, Holtz i dr. [1] predlažu ispitivanje reprezentativnog uzorka materijala koji sadržava čestice šljunka korištenjem proporcionalno sitnijeg materijala koji ima isti oblik granulometrijske krivulje, tzv. metoda paralelne gradacije [1]. U tom slučaju potrebna je metoda usporedbe posmične čvrstoće ispitivanog uzorka i materijala koji sadržava šljunak. Alternativa tome je ispitivanje u uređaju za izravno smicanje s dovoljno velikim okvirom, ali trošak takvog ispitivanja često je prevelik i važnost ispitivanja ga uglavnom ne opravdava [2].

U radu je prikazano ponašanje mješavina krupnozrnatih materijala. Cilj rada je dati jasniji uvid u ponašanje krupnozrnatih materijala; pijeska, šljunka i njihovih mješavina. U radu su prikazana eksperimentalna ispitivanja provedena na šljunku, pijesku i njihovim mješavinama u određenim masenim odnosima, s ciljem davanja jasnijeg uvida u ponašanje krupnozrnatih materijala. Ispitivanja su provedena u uređaju za izravno smicanje s dimenzijom okvira 300 x 300 mm. Provedeno je pet serija ispitivanja na već spomenutim mješavinama. Maseni udjeli pojedinih frakcija prikazani su Tablicom 1 dok su Slikom 1 prikazane granulometrijske krivulje. Ispitivanjem mješavina utvrdilo se njihovo posmično i dilatativno ponašanje.

Tablica 1. Maseni udio pojedinih frakcija

Mješavina	Broj ispitivanja				
	1	2	3	4	5
Udio pijeska (%)	100%	75%	50%	25%	0%
Udio šljunka (%)	0%	25%	50%	75%	100%

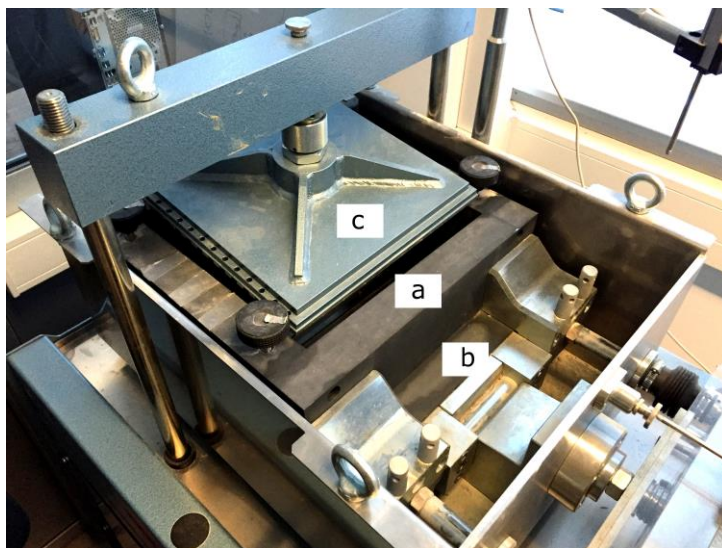
**Slika 1.** Granulometrijske krivulje ispitanih mješavina [3].

Svaka serija pokusa provedena je pri tri različita normalna naprezanja, čineći tako ukupno 15 pokusa. Tijekom ispitivanja su mjerena horizontalana naprezanja, horizontalni pomak i vertikalni pomak. Za svaku od navedenih mješavina utvrđeni su granični koeficijenti pora i specifična gustoća. Uređaj za izravno smicanje s velikim okvirom je jedan od rijetkih uređaja u Hrvatskoj i šire. Mogućnost ispitivanja na uređaju omogućena je od strane EU fonda preko Projekta „Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci“.

2. Uređaj za izravno smicanje

Prije više od 200 godina, Coulomb je koristio preteču uređaja za izravno smicanje kako bi odredio potrebne parametre za svoju jednadžbu čvrstoće tla [1] koja se u mehanici tla i danas koristi. Uređaj se sastoji od okvira za smicanje koji je vertikalno podjeljen u dva dijela, gornji nepomični (Slika 2a)

i donji pomični (Slika 2b). Normalno naprezanje na uzorak se nanosi preko krute opteretne ploče (Slika 2c). Posmično opterećenje mjeri se pomoću mjerne ćelije kapaciteta 100 kN, dok se horizontalni i vertikalni pomaci mjere pomoću mjerila pomaka (Linearni Variabilni Diferencijalni Transformator (LVDT)). Dijeljenjem posmične i normalne sile sa površinom uzorka određuje se posmično i normalno naprezanje na plohi sloma. Treba napomenuti da je ploha sloma unaprijed određena geometrijom okvira za smicanje, uvijek je horizontalna i prolazi sredinom uzorka između pomične i nepomične polovine okvira za smicanje [1].



Slika 2. Dijelovi kutije za izravno smicanje

Istraživanje su provedena na mješavinama krupnozrnatog materijala sa maksimalnim promjerom zrna od 16 mm, što je uvjetovalo opremu na kojoj se materijal mogao ispitati. Svi pokusi, osim pokusa na pijesku maksimalnog promjera zrna 2mm koji je proveden na uređaju za direktan posmik *AUTOSHEAR*¹, provedeni su na uređaju za izravan posmik sa smičnim okvirom dimenzija 300 x 300 mm, *SHEARMATIC 300* [4]. Na Slici 3 prikazani su glavni dijelovi uređaja za izravan posmik s okvirom dimenzija 300 x 300 mm. U Tablici 2 pojašnjeni su dijelovi uređaja prikazanog na Slici 3.

¹ standardni uređaj za ispitivanje uzoraka tla na izravno smicanje s okvirom 60 x 60 mm



Slika 3. Uređaj za izravan posmik s velikim okvirom za smicanje proizvođača Wykeham Farrance [3].

Tablica 2. Dijelovi uređaja za izravan posmik s velikim okvirom za smicanje proizvođača Wykeham Farrance [3].

Oznaka	Opis oznake
a	Sustav vertikalnog opterećenja - poprečna greda
b	Sustav vertikalnog opterećenja - opteretna ploča
c	Kućište okvira
d	Sustav vertikalnog opterećenja - hidraulički klip
e	Sustav vertikalnog opterećenja - mjerna ćelija kapaciteta 100 kN
f	Hidraulička pumpa
g	Sustav vertikalnog opterećenja - LVDT kapaciteta 50 mm
h	Kontrolna jedinica
i	Sustav vertikalnog opterećenja - mjerna ćelija kapaciteta 100 kN
j	Ručka za ručno upravljanje horizontalnim pomakom okvira
k	Naponski prekidači

3. Način provedbe pokusa smicanja

Za potrebe ovog rada provedeni su pokusi na šljunku (Slika 4), pijesku (Slika 5) i mješavinama šljunka i pijeska. Korišteni materijal dobiven je drobljenjem kamena s gradilišta studentskog smještaja na kampusu Sveučilišta u Rijeci na Trsatu. Drobljeni kamen prosijan je na frakciju od 16 mm, što predstavlja gornju granicu veličine zrna koja se može koristiti u uređaju za veliko smicanje [4]. Prema Mitchellu i Sogi [5], fizikalne karakteristike nekoherentnog tla poput šljunka i pijeska definirane su veličinom zrna i oblikom zrna. Veličina zrna definira se prosijavanjem u laboratoriju kroz niz sita, a rezultat se prikazuje granulometrijskom krivuljom (Slika 1). Oblik zrna definira se prema sferičnosti i zaobljenosti materijala koji se ispituje. U prikazanim eksperimentalnim istraživanjima materijal šljunka i pijeska okarakteriziran je kao materijal visoke sferičnosti i male zakrivljenosti [5, 6]. Detaljnije analize nisu provedene zbog ograničenja laboratorijske opreme. Svi pokusi provedeni su na potpuno suhom materijalu pri brzini smicanja od 2 mm u minuti i do maksimalnog pomaka 50 mm, osim ispitivanja na pijesku gdje je brzina smicanja zadana sa 0,5 mm u minuti do maksimalnog pomaka od 15 mm. Svi pokusi provedeni su tako da je uzorak opterećen normalnim naprezanjem koje je održavano konstantnim do barem 90% konsolidacija. Zbog ograničenja prostora u radu nisu prikazani dijagrami konsolidacije uzoraka. Prilikom smicanja vertikalno naprezanje održavalo se konstantnim pomoću utega (pokusi na pijesku), odnosno hidrauličke pumpe (pokusi na mješavinama i šljunku). Prije provedbe pokusa, utvrđene su specifične gustoće šljunka i pijeska prema normi BS 1377 : Part 2 : 1990, poglavlje 8.2 [7], za šljunak, a pijesak prema normi ASTM D 854-02 [8]. Maksimalni koeficijent pora, e_{max} , za pijesak utvrđen je prema normi ASTM D 4254-91 po metodi pokusa C [9], a za šljunak je utvrđen u uređaju za izravno smicanje na način da je uzorak ugrađen u okvir i uz poznati volumen i masu uzorka izračunat maksimalni koeficijent pora, e_{max} . Minimalni koeficijent pora, e_{min} , i maksimalni koeficijent pora, e_{max} , za mješavine utvrđeni su na isti način kao i za šljunak zbog toga što sadrže granulacije veće od 9,5mm pa se ne može provesti pokus po metodi C norme ASTM D 4254-91 [9]. Uzorci za svaku seriju pokusa ugrađeni su u uređaj vodeći računa da koeficijent pora pri ugradnji bude jednak maksimalnom koeficijentu pora ispitanе mješavine.



Slika 4. Šljunak [3]



Slika 5. Pijesak [3]

Materijal uzorka je ugrađen sipanjem sa visine od 1 cm, pazeći pritom da veća zrna zbog njihove mase ne sabiju dodatno manju frakciju te da ne dođe do segregacije do visine uzorka od 15 cm. Dno okvira i opteretna ploča izvedene su kao nazubljene kako bi se ostvario kontakt između uzorka i uređaja. Stranice su blago hrapave kako je predviđeno serijskom proizvodnjom uređaja [4].

Sve serije pokusa provedene su pri tri različita normalna naprežanja od 100, 200 i 400 kPa. Vertikalni i horizontalni pomaci mjereni su pomoću elektroničkog mjerila pomaka (Linearni Variabilni Diferencijalni Transformator (LVDT)).

4. Rezultati ispitivanja

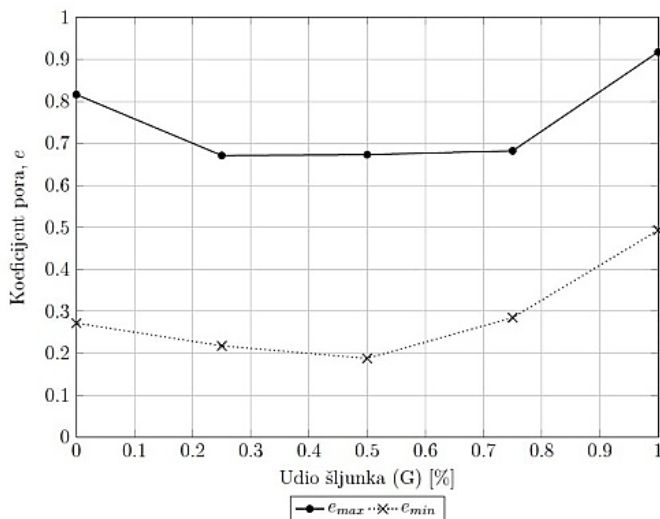
4.1. Specifične gustoće, minimalni i maksimalni koeficijent pora

U Poglavlju 3 navedene su norme po kojima se utvrđuje specifična gustoća materijala. Na temelju ispitivanja provedenih na materijalima pijeska i šljunka, utvrđene specifične gustoće istih: šljunka (G) i pijeska (S), redom:

$$- \rho_G = 2.70 \text{ g/cm}^3;$$

$$- \rho_S = 2.71 \text{ g/cm}^3.$$

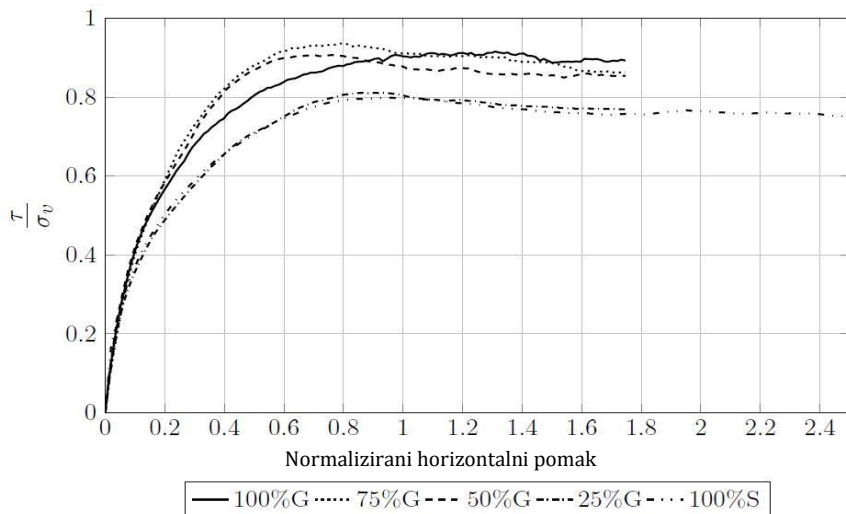
Utvrđeni minimalni koeficijent pora, e_{min} , i maksimalni koeficijent pora, e_{max} , šljunka (G) i pijeska (S) i njihovih mješavina prikazani su na Slici 6.



Slika 6. Određeni e_{min} i e_{max} mješavina [3]

4.2. Normalizirano ponašanje materijala tijekom pokusa

Alternativni način prikaza rezultata ispitivanja materijala opterećenog sa različitim vertikalnim naprežanjima za potrebe međusobne usporedbe je korištenje normaliziranih krivulja. Posmično naprežanje se normalizira normalnim naprežanjem kojim je uzorak bio opterećen, a mjereni pomak se normalizira ukupnom duljinom smicanja. U nastavku teksta, na Slici 7, prikazana je usporedba normaliziranih krivulja naprežanja i pomaka.



Slika 7. Usporedba prosječnih normaliziranih krivulja [3]

Vidljivo je da u mješavini s udjelom od 25% pijeska, pijesak ima značajnu ulogu u ponašanju materijala (čvrstoća je veća u odnosu na druge mješavine). Zrna šljunka su i dalje u kontaktu i u kombinaciji s pijeskom stvaraju značajan dio strukture materijala. Iako se mješavine sa 25% i 50% pijeska vrlo slično ponašaju, može se uočiti smanjenje čvrstoće kod mješavine s 50% pijeska što zapravo znači da zrna šljunka počinju plutati u mješavini pijeska, no još uvijek imaju ulogu u ponašanju takvog materijala. Kod mješavina sa 75% i 100% pijeska nema gotovo nikakve razlike u njihovu ponašanju, što dovodi do zaključka da ponašanjem takvog materijala dominira sitniji materijal unutar kojeg plutaju krupnije čestice bez dodira, što je prikazano i u [3].

4.3. Koeficijent pora pri ugradnji, nakon konsolidacije i kritični koeficijenti pora

Prilikom ispitivanja mjereni su vertikalni pomaci pri smicanju za svaku mješavinu, definiranu u Tablici 1. Prije početka konsolidacije izračunat je početni koeficijent pora, e_0 . Nakon završetka konsolidacije, na osnovu mjenog vertikalnog pomaka proračunat je koeficijent pora pri konsolidaciji, e_{nci} . Korištenjem mjerenih podataka vertikalnih pomaka prilikom smicanja na kraju ispitivanja proračunat je kritični koeficijent pora, e_{crit} . Na Slikama 8, 9, 10, 11 i 12 prikazani su navedeni koeficijenti pora za svaku pojedinu ispitanu mješavinu u odnosu na vertikalno naprezanje pri kojem su mješavine ispitane. Iz teorije kritičnih stanja [11, 12] pretpostavlja se paralelnost normalne konsolidacijske linije (NCL) i linije kritičnih stanja (CSL). Rezultati prikazani na Slikama 8, 9, 10, 11 i 12 ne prikazuju paralelnost dviju linija, što odgovara zaključcima donesenim na osnovu istraživanja provedenih od strane Beena i Jefferiesia [13]. Zanimljiva je konačna vrijednost koeficijenta pora za čisti šljunak (Slika 8) čija je vrijednost veća od koeficijenta pora prilikom pokretana smicanja, što bi trebalo znančiti da je takav tip materijala podložan dilatanciji. No s obzirom da se pojava manifestira samo na vertikalnom naprezanju od 100 kPa, potrebno je detaljnije istražiti takvo ponašanje, možda pri manjim vertikalnim naprezanjima.

4.4. Minimalni, maksimalni i kritični koeficijenti pora

Usporedbom kritičnog koeficijenta pora, e_{crit} , s minimalnim, e_{min} , i maksimalnim, e_{max} , koeficijentima pora primjećeno je da se svi kritični koeficijenti pora nalaze između minimalnog i maksimalnog koeficijenta pora za svaku mješavinu, što se može uočiti na Slici 13. Također vidljivo je da su svi kritični koeficijenti mnogo bliži maksimalnom koeficijentu pora nego što su minimalnom. To dokazuje tvrdnju Wooda [11] da su za značajnu

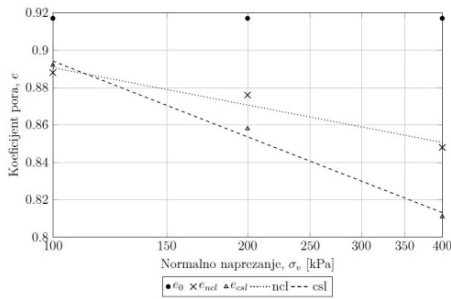
raspodjelu čestica, odnosno značajno zbijanje zrnatog materijala potrebna posmična naprezanja.

4.5. Vršni i kritični kut trenja, ovisnost o udjelu šljunka i kut dilatancije

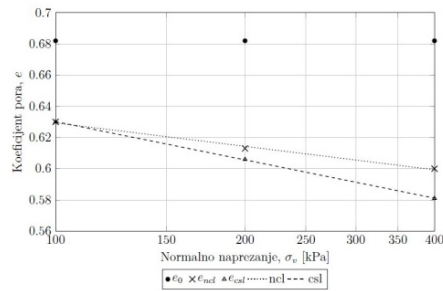
Kut dilatancije (ψ) definiran je kao razlika vršnog i kritičnog kuta trenja na način prikazan Izrazom 1. Odnos kuta dilatancije (ψ) i postotka frakcija šljunkovitih čestica prikazan je na Slici 14.

$$\psi = \frac{\phi_{\max} - \phi_{\text{crit}}}{0.8} \quad (1)$$

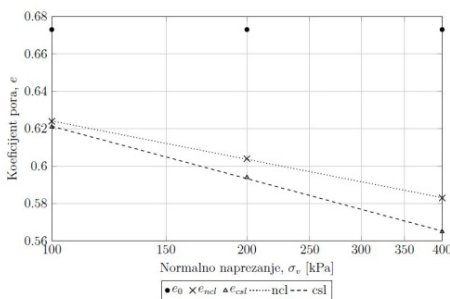
Prema provedenim ispitivanjima, kut dilatancije za mješavinu sa 100% šljunka jednaka je nuli. Pretpostavlja se da je razlog tomu limitiranost uređaja u kojemu se mješavina ispitala. Trend povećanja kuta dilatancije prema Slici 14 daje naznaku da je kut dilatancije veći od 2° .



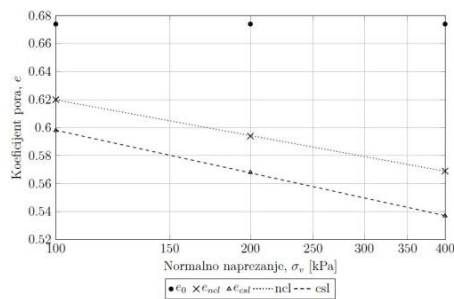
Slika 8. Koeficijent pora, pri ugradnji, e_0 , nakon konsolidacije, e_{ncl} , i kritični koeficijenti pora, e_{crit} , za 100%G [3]



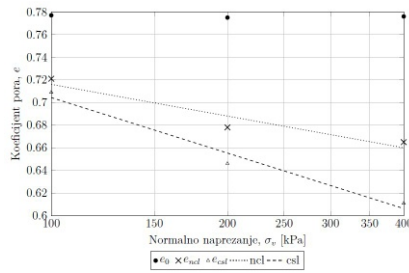
Slika 9. Koeficijent pora, pri ugradnji, e_0 , nakon konsolidacije, e_{ncl} , i kritični koeficijenti pora, e_{crit} , za 75%G 25%S [3]



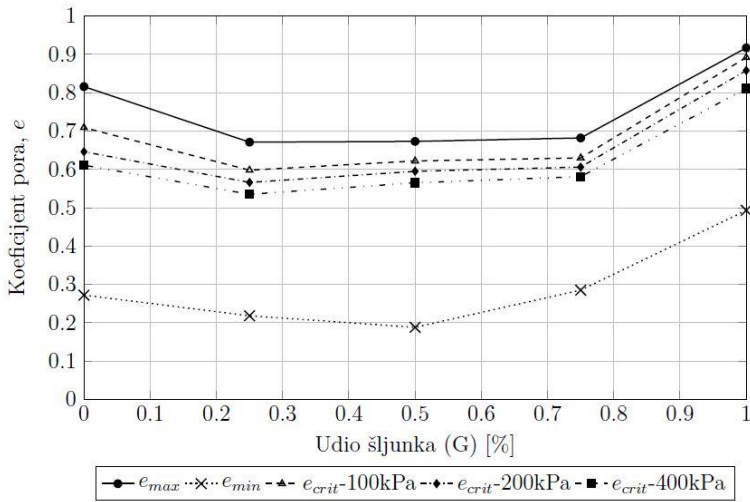
Slika 10. Koeficijent pora, pri ugradnji, e_0 , nakon konsolidacije, e_{ncl} , i kritični koeficijenti pora, e_{crit} , za 25%G 75%S [3]



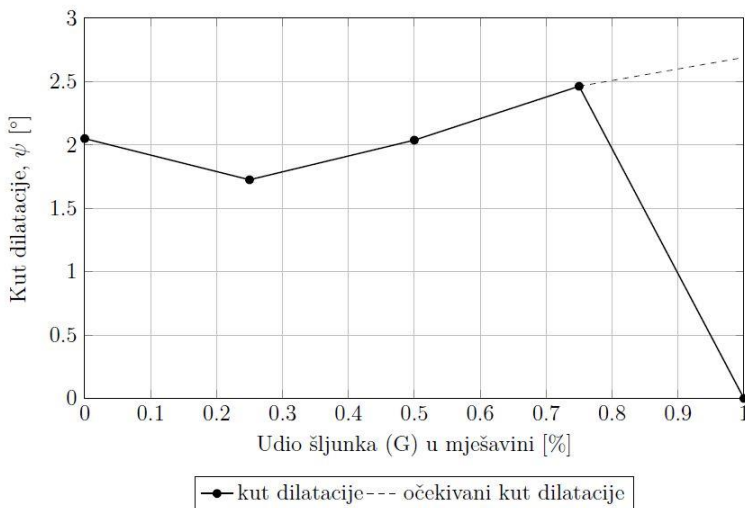
Slika 11. Koeficijent pora, pri ugradnji, e_0 , nakon konsolidacije, e_{ncl} , i kritični koeficijenti pora, e_{crit} , za 25%G 75%S [3]



Slika 12. Koeficijent pora, pri ugradnji, e_0 , nakon konsolidacije, e_{ncl} , i kritični konsolidacije pora, e_{crit} , za 25%G 75%S [3]



Slika 13. Odnosi koeficijenata pora ispitanih mješavina [3]



Slika 14. Kut dilatacije, ψ , u odnosu na udio šljunka (G) u mješavini [3]

5. Zaključak i diskusija

Poznavanje posmičnih i deformacijskih karakteristika materijala vrlo je značajno za kvalitetu izvedbe geotehničkih konstrukcija. U praksi se vrlo često koriste kombinacije mješavina pijeska i šljunka pri izvedbi nasipa, ojačanja temeljnog tla i slično.

U radu su prikazane posmične karakteristike pet kombinacija mješavina, njene deformacijske karakteristike te tendencija dilatanciji.

Eksperimentalnim istraživanjem prikazano je da frakcije pijeska i njegove masene mješavine sa šljunkom pokazuju tendenciju dilatanciji iako se vrijednosti koeficijenta pora prije smicanja nalaze iznad koeficijenata pora pri kritičnom stanju, što nije slučaj sa čistim šljunkom. Kako bi se detaljnije istražio utjecaj krupnozrnastijeg materijala na dilatativno ponašanje potrebno je provesti dodatna istraživanja.

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da u materijalu s već 25% pijeska, pijesak ima značajnu ulogu u ponašanju materijala. Dominacija šljunka postaje zanemariva između 50 i 25% njegovog masenog udjela u mješavini. Ispitivanjem je prikazano kako normalne konsolidacijske linije i linije kritičnih stanja nisu u potpunosti paralelne te da se kritičnih stanja stanja možda ne bi smjela aproksimirati linijom.

Neuniformna raspodjela čestica u uzorku u području plohe smicanja se smatra mogućim razlogom koji bi opravdao nelinearnost kritične krivulje. Jedna od mogućnosti je i ispitivanje u uređaju za troosno smicanje. Takvo ispitivanje ima i brojne prednosti u odnosu na uređaj za izravno smicanje kao što je preciznije praćenje promjene volumena uzorka tijekom pokusa. Dimenzije uzorka za ispitivanje u troosnom uređaju moraju poštovati kriterij koji nalaže da maksimalna veličina zrna ne prelazi jednu šestinu promjera uzorka [13]. Maksimalna veličina zrna šljunka korištenog za potrebe ovog rada je 16 mm, što zadovoljava prethodno navedeni kriterij za ispitivanje u troosnoj ćeliji na uzorku promjera 100 mm. Mišljenje autora je da bi se za potpuno razumjevanje volumetrijskog ponašanja krupnozrnatog materijala trebala provesti ispitivanja na uređaju za troosno smicanje.

Zahvala. *Prikazani rezultati proizašli su iz korištenja opreme dobivene na temelju projekta „Razvoj Istraživačke Infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci-RISK“.*

Literatura

- [1] Holtz, R.D., Kovacs, W.D. i Sheahan, T.C., An Introduction to Geotechnical Engineering, Pearson, 2011
- [2] Simoni, A. i Houlsby, G.T., The direct shear and dilatancy of sand-gravel mixtures, Geotechnical and Geological Engineering, 2004.
- [3] Puniš, U., Ponašanje mješavina krupnozrnatih materijala. Diplomski rad. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2015.
- [4] Wykeham Farrance, SHEARMATIC 300, Large Shearbox Apparatus, INSTRUCTION MANUAL, Travanj 2013.
- [5] Mitchel, J. i Soga, K., Fundamentals of Soil Behaviour, John Wiley & Sons, 3 izdanje, 2005.
- [6] Krumbein, W.C. i Sloss, L.L., Stratigraphy and Sedimentation, W.H. Freeman, 2 izdanje, 1963.
- [7] Head, K.H., Manual of Soil Laboratory Testing, Whittles, 2006.
- [8] Day, R., Foundation Engineering Handbook 2/E, McGraw-Hill construction series, McGraw-Hill Education, 2010.
- [9] Germaine, J.T. i Germaine A.V., Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers, John Wiley & Sons, 2009.
- [10] Fragaszy, R.J., Su, J., Siddiqi, F.H. i Ho, C.L., Modeling strength of sandy gravel, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 118(6):920-936, 1992.
- [11] Wood, D.M., Soil behaviour and critical state soil mechanics, Press Syndicate of the University of Cambridge, 1 izdanje, 1990
- [12] Shofield, A.N. i Wroth, C.P., Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, 1968.
- [13] Been, K., Jefferies, M.G. i Hackey, J., The critical state of sands, Geotechnique, 41:365-381, 1991

PLANIRANJE I IZGRADNJA PRVIH VIŠESTAMBENIH NASELJA DRUGE POLOVICE 20. STOLJEĆA U RIJECI

URBAN PLANNING AND CONSTRUCTION OF THE FIRST RESIDENTIAL QUARTERS IN RIJEKA IN THE SECOND HALF OF THE 20. CENTURY

Srđan Škunca*

Sažetak

Planiranje stambene izgradnje u gradu Rijeci od kraja pedesetih godina prošlog stoljeća zasniva se na koncepciji tzv. kompleksnih stambenih naselja, tj. naselja kolektivnog (višestambenog) stanovanja, opremljenih svim sadržajima i površinama u funkciji stanovanja. Međutim, posebnost tadašnje urbanističke teorije i prakse predstavlja uvažavanje kompleksnog naselja, ne samo kao osnovne jedinice urbanističkog planiranja i prostorne organizacije grada, već i samoupravne političke jedinice, radi čega će za ovakva naselja ubrzo prevladati naziv stambena zajednica. Na ovakvom se pristupu krajem pedesetih godina u Rijeci planirala izgradnja kompleksnih naselja Ogranak, Baredice, Turnić i Autoput. Izbor lokacija bio je ponajviše uvjetovan blizinom industrije, postojeće stambene izgradnje i smještajem uz glavnu gradsku prometnicu, na što su svakako utjecali izgradnja Autostrade Narodne fronte, današnje Zvonimirove i Liburnijske ulice, 1949. godine, kao i radničkih naselja na Zametu i Plumbumu do 1953. Međutim, razvoj inoviranih tehnologija građenja tipskih višestambenih građevina koje krajem pedesetih promoviraju arhitekti Čičin-Šain i Miculinić predstavlja onaj iskorak koji će, ne samo pomoći u planiranju i izgradnji spomenutih naselja, već i fizionomski obilježiti modernizacijske procese razvoja Rijeke tijekom šezdesetih godina prošlog stoljeća. U radu je dan sintezni prikaz istraživanja urbanističkog planiranja i izgradnje spomenutih naselja, utjecaja društveno-političkog konteksta, osnovne urbanističke osobine spomenutih naselja kao i vrednovanje značenja ove razvojne faze grada.

* Grad Rijeka, Odjel gradske uprave za razvoj, urbanizam, ekologiju i gospodarenje zemljištem, Titov trg 3, 51000 Rijeka; E-mail: srdjan.skunca@rijeka.hr

Ključne riječi: urbanističko planiranje, arhitektura, Rijeka, druga polovica 20. st., višestambena naselja, socijalizam

Abstract

From the end of 1950s, housing planning in the City of Rijeka was based on the concept of the so-called complex residential community, namely a neighbourhood of collective housing, equipped with all of the residential facilities and amenities, including public spaces. However, the characteristics of the theory and practice of the socialistic time involved appreciation of the complex residential community not only as the basic unit of urban planning and spatial organization of the city, but also as the unit of political self government. This conceptual unit was dubbed the "residential community". Following this approach, in the City of Rijeka the urban planning of the first residential communities: Ogranak, Baredice, Turnić and Autoput was completed at the end of fifties. The choice of location was inspired by the vicinity of industrial zones, proximity to the main city road and to existing residential areas, all factors obviously influenced by Autostrada Narodne fronte road, completed in 1949 and the worker's settlements Zamet and Plumbum, completed in 1953. However, innovation in construction technologies of multistory buildings for collective housing, promoted by the architects Čičin-Šain and Miculinić, represented a remarkable leap forward, helping not only in further planning and construction of the new collective housing communities, but also in highlighting the physiognomy of the modernization process of the urban development of the City during the 1960s.

This work gives a synthesis of the researches of the urban planning, construction and essential urban characteristics of the mentioned settlements and influenced social and political context and tries to evaluate the significance of this developmental phase of the city.

Key words: urban planning, architecture, Rijeka, second half of 20. ct., housing, socialism

1. Socijalistička teorija i praksa planiranja višestambenih naselja druge polovice 20. stoljeća

Suvremeni pojmovi *višestambeno naselje i izgradnja, višestambena građevina, više/obiteljska građevina* i sl., učestalije se počinju koristiti tek krajem razdoblja jugoslavenskog socijalističkog društveno-političkog uređenja, zamjenjujući postupno pojmove poput: kolektivna izgradnja (stanovanje), društvena odnosno individualna stambena izgradnja, društveno-usmjerena izgradnja i sl. Pojmovna tranzicija ujedno je predstavljala pomak težišta s pravnog statusa i uloge društveno-političke zajednice u stambenoj izgradnji na primarno tipološko-morfološke osobine stana, stambene građevine i stanovanja (u zajedništvu) kao bitne sastavnice planiranja *stambenog naselja*. Iako se potonji pojam jednako koristi i tijekom socijalističkog razdoblja, urbanističko planiranje od kasnih

pedesetih do sedamdesetih godina 20. st. obilježit će *koncept kompleksnog stambenog naselja* kao jedinice susjedstva za koju će ubrzo prevladati naziv *stambena zajednica*. [Bižaca, 1978:199]

U kontekstu izrazito modernističkog pristupa planiranju grada, tijekom druge polovice 20. stoljeća jedan od vodećih planera, arhitekt Draško Bižaca, daje veoma plastičan opis urbanističkog poimanja *stambene zajednice* koja treba svojim stanovnicima omogućiti "*sređen, zdrav i ugodan život u vedrom, sunčanom, ozelenjenom i mirnom gradskom ambijentu, u kojem mogu zadovoljiti potrebe da se svakodnevno snabdijevaju živežnim namirnicima i kućnim potrepštinama, da imaju osiguranu liječničku njegu, razne servise i usluge, zbrinjavanje i odgoj djece od rođenja do završene osnovne škole, te mogućnost društvenog života i rekreacije.*" [Bižaca, 1969: 33]

Međutim, posebnost koncepta predstavlja ideologizacija planerskog pristupa kojom se, prema Edvardu Kardelju, istaknutom teoretičaru jugoslavenskog socijalizma, stambena zajednica istovremeno promatra i kao "*jedinica urbanističkog plana*" i kao "*jedinica i oblik samoupravljanja u komuni*" i kao nositelj "*proširene materijalno-tehničke baze za svakodnevni život porodice i pojedinca.*" [Marinović-Uzelac, 1978:182] Budući da stambena zajednica, kao prostorno i funkcionalno zaokružena naseljska cjelina postaje osnovna upravna jedinica grada/općine, za ustroj društveno-političke zajednice važna je i njezina veličina, tj. broj stanovnika koji se preporučuje u rasponu 4.500-11.000, odnosno 5 -8.000 stanovnika kao optimum. [Marinović-Uzelac, 1978: 182]

2. Pretpostavke nastanka riječkih "kompleksnih naselja"

Izgradnja kompleksnih naselja u Rijeci nastala je kao rezultat postojanja i ispunjenosti više pretpostavki i to: socijalno-demografske, društveno-političke, tehničko-tehnološke i planerske.

Socijalno-demografske pretpostavke bile su ostvarene već 1953. godine kada je na području triju riječkih općina: Stari grad, Zamet i Sušak popisano 75.328 stanovnika. Prekoračenje predratnog broja ponajprije je posljedica doseljavanja u razdoblju 1946.-1952., i to čak 3.263 osoba prosječno godišnje. Razvojem lučko-industrijskog, prometnog i infrastrukturnog kompleksa, Rijeka ostaje privlačno migracijsko odredište koje u razdoblju od 1953. do 1961. godišnje privlači prosječno 2.770 novih stanovnika. [Bagić, 1978:9] Kontinuitet imigracijskog procesa postupno stvara sve očitiji raskorak između broja novoizgrađenih i/ili adaptiranih stanova i stambenih potreba novih stanovnika grada te 1955. godine Narodni odbor grada prihvaća kako je realna potreba za izgradnjom 1200 novih stanova godišnje. [5]

Sustavni *politički poticaj društvenoj stambenoj izgradnji* donosi tek savezna Uredba iz 1958. kojim je uvedena obveza osnivanja fondova za

kreditiranje stambene izgradnje, te izdvajanje 10% iznosa neto osobnih dohodaka koji se usmjerava u pripremu i gradnju. Zakonske novine Rijeka je dočekala spremna jer je još u lipnju 1955. osnovala *Fond za kreditiranje stambene izgradnje* [6] koji je u tu svrhu prikupljao novac iz proračuna i iz dobiti građevnih poduzeća, kako je bilo predviđeno društvenim planom grada.

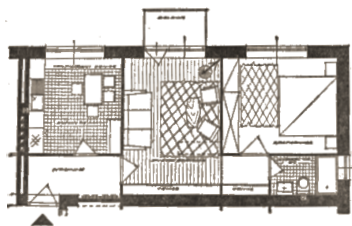
Temeljem savezne Uredbe i uputstava Izvršnog vijeća NR Hrvatske [7] izrađena je *Odluka o usmjeravanju stambene izgradnje na području grada Rijeke za razdoblje 1959.-61.*, koju je Gradsko vijeće donijelo 25. prosinca 1958. godine. [8] Sastavni dio Odluke čini *Program i prostorni plan stambene izgradnje na području grada Rijeke* prema kojemu se u organizaciji Biroa stambene izgradnje (koji Gradsko vijeće u srpnju 1959. uspostavlja kao Zavod za stambenu izgradnju) do 1962. unutar 4 kompleksna stambena naselja treba izgraditi najmanje 1.998 stanova različite strukture te 450 ležaja za samce (članak 9. Odluke), oslanjajući se na Odlukom utvrđenu veličinu stana (na pr., najveća površina stana s 2 ležaja 30 m², s 4 ležaja 60 m², a stana sa 6 ležaja 72 m²), njegovu finalnu obradu i cijenu izgradnje. Važno je uočiti upravo ovu višeslojnost programa jer se na podlozi nužnosti stambenog zbrinjavanja pokreću važni procesi u rasponu od urbanizacije grada do skokova u organizaciji procesa pripreme i produkciji stambene izgradnje.

Tehničko-tehnološke pretpostavke počinju se ozbiljno stvarati polovicom 50-ih godina kada u Rijeci kulminira nezadovoljstvo političkih elita brzinom i cijenom dotadašnje višestambene izgradnje te brojem novoizgrađenih stanova. U siječnju 1955. predsjednik NO grada Rijeke Edo Jardas saziva stožerni sastanak Savjeta za komunalne poslove, Odbora za stambenu izgradnju i predstavnika građevinskih poduzeća i projektnih ustanova na temu racionalizacije višestambene izgradnje u gradu. Tematski raspon obuhvatio je projektantski pristup, izbor materijala, unaprjeđenje organizacije i tehnologije građenja, mogućnosti primjene tipizacije i novih tehnologija. [5] Time je pokrenut razvoj projekta ekonomične i jeftine višestambene izgradnje kao projekta od političkog interesa. Pod popularnim nazivom "*stan za 1,5 milijuna dinara*" i "*stan za milijun dinara*", projekt se razvijao u razdoblju 1955.-59., a do izvedbe su ga dovela tri riječka građevna poduzeća: "Rječina" 1958., "Jadran" 1959. i "Primorje" 1960.

Unutar stručnog dijela, u razradi projekta postavljena su dva cilja. Prvi je bio usmjeren na rješavanje dvosobnog stana, kao najčešće traženog [5], čija će racionalna prostorna organizacija utjecati na racionalizaciju konstrukcije zgrade, a tehnologijom građenja te tipizacijom građevinskih elemenata i opreme stana i zgrade treba smanjiti ukupnu cijenu stana kao i vrijeme izgradnje. Drugi je cilj usmjeren na osmišljavanje projekta građevine koja bi bila potpuno

fleksibilna u odnosu na uvjete smještaja i primjenjiva na svakoj gradskoj mikrolokaciji.

Otprilike u isto vrijeme, dva riječka građevinska poduzeća "Rječina" i "Jadran" razvijaju dva nova koncepta građenja kako bi s njima izborila odgovarajuću poziciju u odnosu na Biro stambene izgradnje preko kojega se tada, u pravilu, ugovarala izgradnja za krajnjeg kupca. Građevno poduzeće "Rječina" prema projektu svojega projektanta, arhitekta Klementa Miculinića, u srpnju 1958. godine na Bulevaru započinje s izgradnjom stambene višekatnice tipa "Rječina" s 18 stanova, u kojoj prosječan stan stoji tadašnjih 1.5 milijuna dinara [9], dok u Ulici senjskih uskoka na Brajdi, Građevno poduzeće "Jadran" početkom 1959. godine, prema projektu arhitekta Andrije Čičin-Šaina, voditelja projektnog biroa poduzeća, koji je svoj koncept razradio s inženjerima Mihovilom Doričićem, Matom Senjanovićem i Zvonkom Grandićem [10], započinje izgradnju višekatnice s 25 stanova za tadašnje poduzeće "Voplin", prema kojemu ovaj koncept dobiva ime [Gović, 2009:21], a u kojoj prosječan stan košta 1.350.000 dinara. [10]



Slika 1. Klement Miculinić, Dvosobni stan za 4 osobe [9]



Slika 2. Andrija Čičin-Šain, Dvosobni stan za 4 osobe [11]

Sličnosti obaju tipova očituju se u visini S+P+5, izostavljanju lifta, broju stanova na stubištu (4), prosječnoj površini stana od oko 50 m², bogatoj kolorističkoj obradi pročelja. U pogledu tehničko-tehnoloških iskoraka i inovativnosti prednjačio je koncept "Voplin" koji je, zahvaljujući skromnim tlocrtnim dimenzijama od 15 m x 15.8 m (svega 237 m² tlocrtnne površine) i vertikalnim smicanjem etaža (dva stana/polupodestu) postigao dobro prilagođavanje građevine nagibu terena i time uklapanje u raspoložive lokacije.

Planerske pretpostavke ugrađene su u prethodno spomenuti *Program i prostorni plan stambene izgradnje...*, izborom lokacija za izgradnju kompleksnih stambenih naselja: Ogranak, na području tadašnje Općine Sušak te Baredice, Turnić i Autoput, na području Općine Zamet. U pogledu veličine, stambenog kapaciteta i tipologije gradnje, izbor lokacija izveden je iz radnih elaborata Prijedloga Generalnog urbanističkog plana iz 1958., [12] a potvrđen višekriterijalnom analizom koja se oslanjala na ocjenu sljedećih čimbenika: blizina zone industrije, blizina centra višeg reda, odnosno

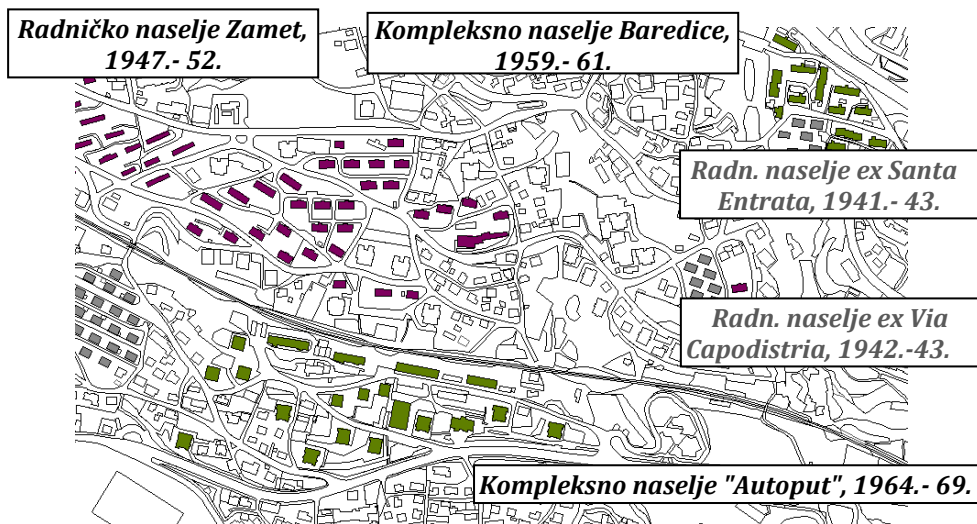
rajonskog centra Zameta, položaj uz glavnu gradsku magistralu istok-zapad, ranije započeta nova izgradnja stanova u promatranom području (posebno u svijetlu ulaganja u komunalnu infrastrukturu), postizanje velike gustoće naseljenosti uz potpuno zadovoljavanje potreba stanovnika u stambenim zajednicama, raspoloživost zemljišta tj. zemljište bez visoke vegetacije, potrebe rušenja starih zgrada i preseljenje stanara, povoljni zdravstveni uvjeti zbog udaljenosti od izvora zagađivanja zraka (luke i industrija) i blizina rekreativne zone uz morsku obalu, za naselje Ogranak. [Bižaca, 1978:200, 201] Očito je kako se izborom komunalno opremljenih, slobodnih i prostranih lokacija smještenih dovoljno blizu tadašnjih radnih zona, nastoji postići ekonomija zahvata, ali i povezati naslijeđene i nove urbane strukture i tako uspostaviti urbanu kompaktnost te pokrivenost centralnim sadržajima većih stambenih područja.

3. Planiranje i izgradnja kompleksnih naselja

3.1. Baredice i Ogranak, 1958. - 1962.

Naselje Baredice planirano je u sjevernom nastavku omanjeg radničkog naselja Santa Entrata, izgrađenog 1941.-43., [Škunca, 2014:475-477] na obronku poviše Istarske ulice. (Sl. 3.) Zahvaljujući raznovrsnoj strukturi: 66 jednosobnih stanova (2 ležaja), 98 dvosobnih stanova (4 ležaja) te 42 trosobna stana (5 ležaja), naselje je planirano za smještaj 734 osobe [14] čime je okrupnjena dotadašnja stambena enklava u neposrednoj blizini radničkog naselja "3. maja" i "Torpeda", izgrađenog 1947.-52.

Zahvaljujući položaju i galerijskoj organizaciji stambenih građevina male katnosti (P+2-3) i s elementima primorske arhitekture, morfološka organizacija Baredica posjeduje toplinu internih zelenih dvorišta i javnih površina koje funkcioniraju kao ulični prostori. Nažalost, u izboru građevinskih materijala, izvedbi završne obrade i opremanju stanova svjesno se ekonomiziralo: *"stanovi ...opremljeni su na isti način, vrlo skromno i ekonomično i to u svrhu postizavanja što veće ekonomičnosti izgradnje naselja"*. [14] Tako su, primjerice, podovi dnevnih i spavaćih soba izvedeni u specijalnom lesonitu na podlozi izolirke debljine 2 cm, dok je završna obrada zidova kupaonica izvedena uljenim naličjem te je cjelokupni izgled i ugođaj naselja ubrzo poprimio izrazito socijalnu notu. (Sl. 5.)



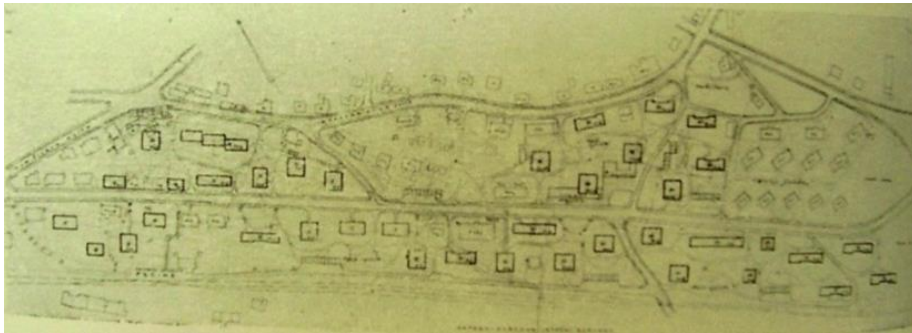
Slika 3. Odnos naselja Baredice i Autoput (zeleno) i okolnih stambenih naselja

Otprilike u vrijeme dovršenja Baredice pokrenuta je izgradnja naselja Ogranak. U urbanističkom planiranju Ogranak evidentno je naslanjanje na predratni plan Sušaka kojim je bila predviđena regulacija područja sjeverno od željezničke pruge duž Pećina, na potezu Krimeja-Plumbum.

Okosnicu naselja čini dugačka i gotovo pravocrtna Ulica Drage Gervaisa, proboj koje je započeo prije 2. svj. rata. (Sl. 4). Na njezinom zapadnom potezu tijekom 30-ih godina izgrađeno je više vila i višestambenih najamnih zgrada, dok je na njenom istočnom kraju, u razdoblju 1948.- 53. izgrađeno omanje radničko naselje tvornice "Vulkan". Stambeni tornjevi (Sl. 6) i višestambeni nizovi novog naselja Ogranak smješteni su u zelenim površinama s obje strane ulice. U odnosu na Baredice, posebnost Ogranak upravo je oblikovanje morfologije naselja variranjem tipologije stambenih građevina i ekspresije potencijala krajobraznog uređenja pri čemu se pravilnim položajem pojedinih grupa građevina u odnosu na ulicu neizravno sugerira građevinski pravac.

Od planiranog broja, do 1961. bilo je izgrađeno 824 stanova, a u gradnji ih je bilo još oko 300. [Kolacio, 1961.1:14] Do kraja izgradnje, stambeni kapacitet podignut je na 5.000 stanovnika, što je s obzirom na površinu, izazvalo visoku gustoću od 435 st./ha, ali radi kvalitete položaja, plana i stambenih građevina, naselje nije obilježeno onom socijalnom notom kakvu je zadobilo naselje Baredice.

Otprilike u težištu naselja izveden je 1964. opskrbni centar (ukupne površine 800 m²) koji, na žalost, nije uspio postati i društveno integrativni prostor naselja, dijelom i zbog reduciranosti sadržaja isključivo na potrebe dnevne opskrbe. [17]



Slika 4. Zdenko Sila, regulacija stambenog naselja "Ogranak" [16]



Slika 5. Turketo, Karlavaris: Tip stambene građevine s dvosobnim stanovima u stambenom naselju Baredice, 1958.-60. [Foto: autor rada]

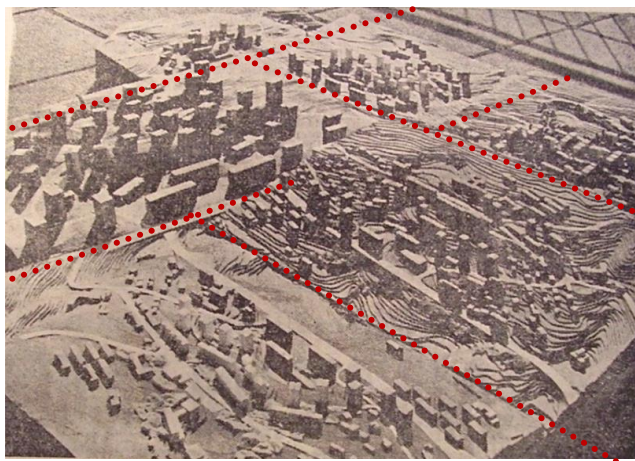


Slika 6. Stambeno naselje Ogranak u izgradnji, suvremena fotografija

3.2. Turnić - Integracija planiranja, projektiranja i izvedbe

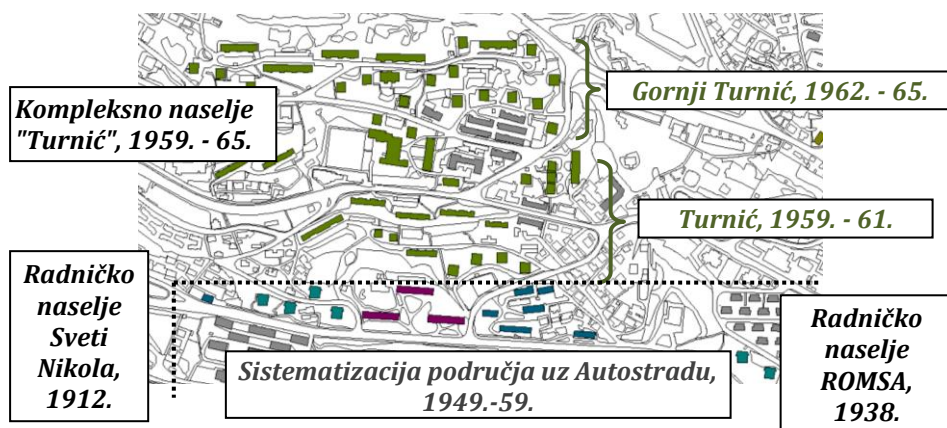
Model ekonomske tipске građevine, prezentiran 1958., bio je pozdravljen kao uzor - rješenje brze i jeftine gradnje, pa tako i brzog i učinkovitog rješenja nagomilanih stambenih problema. Međutim, da bi se dokazala mogućnost cjelovitog planiranja novih stambenih naselja i ekonomičnosti izgradnje, Biro stambene izgradnje Rijeka pripremio je i 22. lipnja 1958. godine raspisao *Natječaj za izradu idejnih projekata kompleksnog naselja Turnić*, smještenog između Bulevara Marxa i Engelsa i Čandekove ulice, s rokom predaje radova 15. listopada [18]. Od natjecatelja se očekuju kvalitetna planska i projektna rješenja, te primjena tehnologije izgradnje kojom će se u najvećoj mogućoj mjeri racionalizirati tijekom izvedbe i postići što niža cijene izgradnje i pojedinog tipa stambene građevine i naselja u cjelini.

Ispunjavanje cilja natječaja zahtijevalo je po prvi put u riječkoj poslijeratnoj praksi interdisciplinarnu suradnju urbanista, arhitekata, konstruktera, tehnologa izgradnje i drugih profila, kroz koju će se osmisлити cjelovito urbanističko rješenje naselja, projekte višestambenih zgrada s ukupno 500 stanova, građevine centralnih javnih i naseljskih sadržaja, a po potrebi i komunalnih građevina. (Sl. 7.)



Slika 7. Makete svih natječajnih radova za urbanističko-arhitektonsko rješenje kompleksnog naselja Turnić, 1958. [19]

Natječaj je okončan dodjelom tri druge nagrade i to: radu projektne grupe arhitekta Zdenka Sile (B. Tomašić, V. Karlavaris, Č. Persen, C. Premuš, N. Buljević i M. Švalba), koji je ocijenjen kao najbolje rješenje naselja i iz kojega usvojena dva tipa stambenih objekata sa stanovima od četiri i šest ležajeva [19], radu projektne grupe arhitekta Davora Švalbe (I. Emili, A. Felice, A. Skarpa, Lj. Kuntarić, E. Moreti, A. Plišić), nagrađene za najbolje rješenje stana s 4 ležaja (a još tri tipa zgrada ocijenjena su prihvatljivim za izgradnju), obje iz GP "Primorje" te radu projektne grupe arhitekta Dušana Marčeta iz poduzeća "Vodogradnja" (S. Stanić, P. Jušnjevski, V. Dokmanović, J. Tadin i T. Tkalčić), nagrađene "za najbolje rješenje takozvanih nebodera i objekata društvenog standarda." [19] Najbliže natječajnim očekivanjima bile su projektne grupe GP "Primorja" koje su dosljedno primijenile "montažni sistem gradnje od teških i lakih betonskih elemenata i najviše su se približile industrijskoj izgradnji kuća." [19] Uzimajući od svakog rada nagrađeni dio, izvedeno je naselje sublimiralo urbanističko rješenje arhitekta Sile, višekatkice Sile i Karlavarisa, stambene tornjeve Marčeta, kao i montažne višekatkice "Primorja" kao posve novu tehnologiju koja će najprije biti primijenjena na prototipskoj gradnji u Osječkoj ulici 1960. godine [20], ali i smještaj centra naselja na raskrižju Čandekove i Ulice A. Barca prema rješenju projektne grupe Marčeta. U pogledu udovoljavanja ekonomskim zahtjevima, ponuđena rješenja pretpostavljala su izvedbu stana prosječne veličine po cijeni od 1,5 milijuna dinara, čime su ispunjena očekivanja budućih kupaca, ali i potvrđena primjenjivost novih koncepcija u široj i zahtjevnijoj izvedbi [19].



Slika 8. Odnos kompleksnog naselja Turnić (zeleno) i okolnih naselja

Od planiranih 500, tijekom gradnje naselje je naraslo na gotovo trostruki broj stanova (1.390). Naime, u razdoblju od 1959.- 61. izgrađeno je stambeno naselje Turnić s ukupno 45 novih stambenih građevina visine od 5 do 11 katova s 830 stanova, [Kolacio, 1961.2:12, 13] opremljeno opskrbnim centrom i, nešto kasnije, i dječjim vrtićem (Sl. 8., 9.), a do 1965., prema urbanističkom rješenju arh. Draška Bižace, nastavak naselja sa 660 stanova [Bižaca, 1978:202] između Čandekove ulice i koridora zaobilaznice, nazvan Gornji Turnić, u kojemu, međutim, većinu stambenih zgrada različitih tipologija projektira Ada Felice Rošić iz projektnog biroa GP "Primorje" kao glavnog izvođača naselja [Butković-Mičin, 2013:63]. U ovoj fazi izgradnje podignute su i zgrade osnovne škole (1963.) i dječjeg vrtića (1964.), dok su ostali javni sadržaji (ambulanta, knjižnica, sjedište mjesnog odbora i dr.) izgrađeni bitno kasnije.



Slika 9. Stambeno naselje Turnić u izgradnji, stanje 1961. [21]

3.3. Naselje Autoput, 1961.

Okončanjem planskih i projektnih aktivnosti usmjerenih na izgradnju stambenog naselja Turnić¹, pokrenut je projekt stambenog naselja "Autoput", kasnije nazvanog Kantrida, u neposrednom zaleđu brodogradilišta "3. maj" i obalne industrije, izgradnja kojeg započinje u listopadu 1963 [24].

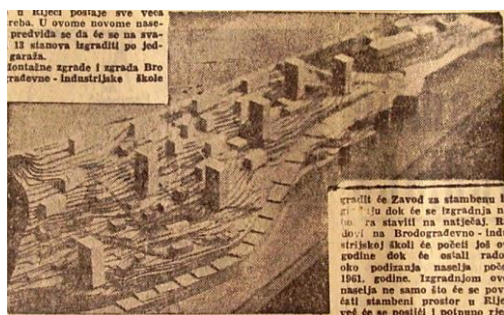
Arhitekt Draško Bižaca urbanistički rješava novo naselje između pruge i Liburnijske ulice na neizgrađenim površinama naselja Kantrida, glavina kojeg je, nakon izgradnje Liburnijske ulice 1949., ostala s njezine južne strane. U novo naselje trebao je biti uklopljen preostali ambijent raštrkanih stambenih vila i kuća duž njezine sjeverne strane, zajedno sa župnom crkvom izgrađenom prije 2. svjetskog rata. (Sl. 3). Oblik područja površine oko 13 ha nametnuo je organizaciju izduženog stambenog naselja (Sl. 10.) pri čemu je zapadna cjelina naselja (~9 ha) namijenjena izgradnji 896 stanova s pratećim sadržajima, dok je istočna cjelina (~4 ha) planirana za izgradnju Brodograđevno-industrijske škole (na mjestu današnjeg prenoćišta "Kantrida") i još 104 stana istočno od nje, duž Liburnijske ul. (nerealizirano). Slično naselju Turnić, morfologija naselja temelji se na kombinaciji tipologije tornja i višestambenih nizova. U izvornom obliku, uglavnom duž prometnice, plan locira 6 stambenih tornjeva visine 15 katova (pretpostavljenog kapaciteta 95 stanova) s ukupno 480 stanova. Preostalih 520 stanova pretpostavljeno je u višestambenim katnicama kvadratične ili pravokutne osnove. [25]

Iako su stambeni tornjevi potpuno uvedeni u riječku urbanističku i graditeljsku praksu s naseljima Ogranak i Turnić, njihova zamišljena katnost na Kantridi nadilazi dotadašnje primjere te čak nailazi i na otpor građana. Međutim, na primjeru Kantride stambeni tornjevi nisu bili zamišljeni samo kao konstitutivni element naselja, već da "*... svojim vertikalama poljepšaju i naglase pristup i ulaz u grad*" [26]. U kontekstu ovakvog očekivanja, projektno rješenje stambenog nebodera postalo je predmetom hrvatskog natječaja za izradu idejnog rješenja, raspisanog početkom svibnja 1960., s rokom predaje do 15. srpnja [27].

Prva nagrada dodijeljena je rješenju arhitekta Mirze Pašića, druga nagrada rješenju Ninoslava Kučana i Aleksandra Dragomanovića, treća radu Andrije Čičin-Šaina, a jedan od četiri otkupa dodijeljen je radu Klementa Miculinića. [28] Nakon naknadnih dorada (kojima je broj stanova smanjen na 80), projekt je realiziran tijekom izgradnje naselja Kantrida do 1968. godine (Sl. 11), a potom i u naselju Krimeja. Što se naseljskih horizontala tiče, one nisu bile predmetom

¹ Planiranje i izvedba naselja na opisani način u Rijeci se više nikada nije ponovila. Međutim, grad Split je u listopadu 1961. raspisao vrlo sličan natječaj za naselje Sv. Mande-Škrape tražeći urbanističko rješenje, idejne projekte stambenih i javnih građevina, tlocrte karakterističnih tipova stanova i investicijski program. Jedan od članova ocjenjivačkog suda bio je arhitekt Zdenko Sila iz Rijeke. [Tušek, 1996:117]

natječaja; njih 8 izvodi se u obliku montažnih šesterokatnica tipa "Primorje", izdužene tlocrtno osnove i 4 peterokatne građevine.



Slika 10. Maketa naselja Autoput, 1960. [25]



Slika 11. Stambeni tornjevi uz Liburnijsku ul. po izgradnji [29]

4. Zaključno razmatranje

Učinke izgradnje kompleksnih naselja neophodno je višestruko analizirati jer je riječ o izuzetno važnom razdoblju poslijeratne urbanizacije grada Rijeke.

U odnosu na odrednice *Programa stambene izgradnje*, izgrađena su planirana kompleksna naselja (Tablica 1), iako ne sva u razdoblju do 1961., dok je naselje Turnić brojem stanova i prostorno gotovo udvostručeno. Od planiranih najmanje 1.998 stanova, radi kasnijeg započinjanja izgradnje naselja Autoput, u kompleksnim naseljima izgrađeno je do 1961. njih 1.860, ali na području grada ukupno 2.505, čime je ne samo ostvaren ovaj programski cilj, već je u odnosu na razdoblje 1956.-1958. stambena izgradnja povećana za 180 %. [usporedbom podataka prema Serdinšek: 1978: 32,39,40].

Međutim, kritički odnos neophodan je u odnosu na ostvarenje atributa "kompleksnosti". Naime, unatoč izrazitog političkog utjecaja na lanac stambene izgradnje od uprave do izvoditelja finalnog proizvoda, isti je izostao u segmentu izgradnje javnih i društvenih te naseljskih sadržaja istovremeno s izgradnjom stambenih građevina.

Naime, u naselju Baredice takvi sadržaji nisu ni bili planirani, kako radi malog broja stanovnika tako i najvjerojatnije radi blizine radničkog naselja na Zametu (u kojem su takvi sadržaji dijelom postojali a dijelom bili planirani), dok su u ostalim naseljima prateći sadržaji izgrađeni ili u nedovoljnom opsegu (Ogranak, Autoput) i/ili u bitnom vremenskom pomaku u odnosu na stambeni sadržaj (Autoput, djelomično Turnić). Time je narušen karakter kompleksnosti naselja, uspostava planiranog modela organizacije grada, ali i uskraćena prilika organskog i uzajamnog srastanja novih naselja i njihovih stanovnika. Na žalost, i u urbanističkoj organizaciji gotovo svakog naselja izostalo je planiranje težišnog javnog i naseljskim sadržajima komplementarnog prostora koji bi pridonio oblikovanju životnih navika i stilova kod stanovnika naselja.

Tablica 1. Usporedni prikaz osnovnih pokazatelja kompleksnih stambenih naselja

	Naselje	Vrijeme izgradnje	Površina (ha)	Stanova	Katnost	Stanovnika	Gustoća (st./ha)
1.	Baredice	do 1958.	~0,5	24	P+1	~ 96	190
		1958. - 1961.	~2,0	206	P + 2	734	367
2.	Ogranak	do 1959.	11,5	132	P-P+3	~ 550	48
		1959. - 1962.		1340	P+5 - 10	5.000	435
3.	Turnić + Gornji Turnić	do 1959.	13,3	~ 700	P-P+8	3.100	233
		1959. - 1961.		830			
		do 1965.	13,7	590	P+5 - 11	5.800	436
4.	Autoput	do 1962.	~1,0	~ 30	P-P+1	140	140
		1962. - 1969.	~ 8,0	896	P+6 - 15	3.600	450
	UKUPNO		50,0	*3.862		*15.134	274

Izvor: 1/[14]; 2, 3/[16], [21]; 4/[31] i autorska istraživanja

* u iskaz nije uključen broj zatečenih stanova i stanovnika

S druge strane, analiza nekih urbanističkih pokazatelja ukazuje na dvojbenu karakter kompleksnosti novih naselja. S jedne strane, u svim naseljima osim Baredice, postignute su visoke (bruto) gustoće novog stanovanja, oko 450 st./ha, čime je potvrđen "urbani" doseg i karakter ukupnog Programa. S druge strane, primjenom kriterija broja stanovnika u tadašnjoj jugoslavenskoj urbanističkoj praksi, jedino se naselja Ogranak i Turnić mogu smatrati "pravom" stambenom zajednicom. Baredice se ni po ovom kriteriju ne može smatrati kompleksnim naseljem, dok se planiranje naselja Autoput reduciralo na površinu neizgrađenog zemljišta, radi čega je izostala ponajprije njegova elementarna integracija s već izgrađenim dijelovima Kantride, a potom i adekvatan urbanistički odgovor uređenja drugih obodnih površina.

Ne ulazeći na ovom mjestu u detaljnije urbanističko-arhitektonske analize koje bi na pr. ukazale na problematičan odnos prema dimenzioniranju i vođenju prometne i komunikacijske mreže (pristupačnost stambenim građevinama) u naseljima Ogranak i Turnić, moguće je ipak ustvrditi kako fizionomske i morfološke osobine gotovo svih kompleksnih naselja ukazuju na CIAM-ovske ideje modernog urbanizma i arhitekture kao ishodište i poticaj. Štoviše, u svojoj prvoj povelji iz 1928., CIAM naglašava uvjetovanost arhitekture političkim i ekonomskim prilikama te potrebu standardizacije i racionalizacije metoda rada i u arhitekturi i u građevinskoj industriji [Frampton, 1992:293], a što su upravo bili širi ciljevi političkih elita u provedbi Programa stambene izgradnje. Moguće je stoga zaključiti kako su tijekom promatranog razdoblja nastala urbanistička i arhitektonska rješenja koja realno dokumentiraju duhovne, materijalne, društvene i druge prilike koje su u bitnom odredile način njihova nastanka i realizacije. Ovo tim više jer se u drugoj polovici 60-ih u europskom urbanizmu

javljaju nove struje koje u planiranje vraćaju temu ulice, oživljavaju blokovske forme i td.

Svakako je potrebno upozoriti i na činjenicu kako se dovršetak izgradnje većine kompleksnih naselja dogodio uoči nastupa privredne reforme 1965. kojom je napuštena planska privreda u korist tržišnog gospodarstva. Budući da u novom kontekstu stan postaje tržišni proizvod koji se nudi bez posrednika (lokalne uprave i sl.), novostečeno iskustvo građevinskih poduzeća pomoglo je u osvajanju nove pozicije na stambenom tržištu. Iako je riječ o posve novoj temi, važno je ukazati kako se tip stambene višekatnice "Voplin" potvrdio i kao osnova za različite izvedenice u skladu s tržišnim potrebama, zahvaljujući kojima se nametnuo kao tipološko-morfološki "standard" u urbanizaciji i planiranju riječkog prostora sve do kasnih 70-ih godina.

Literatura

- [1] Bižaca, D. (1978.), *Stanovanje u dosadašnjoj prostornoj strategiji Rijeke*, Ur. Rogić, I., *Studija stanovanja, Knjiga podataka*, str. 129.-273. Zavod za izgradnju Rijeke, OOUR Razvojno-urbanistički biro, Rijeka,
- [2] Bižaca, D. (1969.), Generalni urbanistički plan grada Rijeke, Skraćeni tekst obrazloženja, Urbanistički institut Rijeka,
- [3] Marinović-Uzelac, A. (1978.), *Socijalni prostor grada*, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb,
- [4] Bačić, I., (1978.), Globalna razdioba stanovništva SR Hrvatske 1971. god. i pretpostavka rasta do 2.000. god., u: Rogić, I., ur., *Studija stanovanja, Knjiga podataka*, str. 1-15, Zavod za izgradnju Rijeke, OOUR Razvojno-urbanistički biro, Rijeka,
- [5] Zapisnik broj 4 zajedničke sjednice Savjeta za komunalne poslove NOG Rijeka, Odbora za stambenu izgradnju i predstavnika građevinske operative i projektnih ustanova iz Rijeke, od 28.1.1955., DAR, JU 16, K 176
- [6] Odluka o načinu uplate i upotrebe sredstava fondova za kreditiranje stambene izgradnje (Službeni vjesnik Kotara Rijeka, 15/55)
- [7] Uputstva NR Hrvatske o usmjeravanju stambene izgradnje, donesena u svibnju 1958.
- [8] Službeni vjesnik kotara Rijeka broj 6/59.
- [9] N.V., *Stan za milijun i po dinara*, Novi list, 3.7.1958.
- [10] V.S., Najjeftinija stambena zgrada u zemlji, Novi list 3.2.1959.
- [11] Gović, V. (2009.), *Andrija Čičin-Šain*, katalog, Muzej grada Rijeke
- [12] DAR, JU 169 -376
- [13] Škunca, S. (2014.): *Planiranje i izgradnja radničkih naselja u Rijeci u svijetlu društveno-političkih promjena u razdoblju 1940.-1945.*, u: N. Palinić, Rotim Malvić, J., Đekić, V., ur., V međunarodna konferencija o industrijskoj baštini,

- Rijeka i industrijsko graditeljsko nasljeđe, 2012., Zbornik radova, 467 - 484, ProTorpedo, Rijeka
- [14] Tehnički opis za naselje "Konfin", Građevno-projektni zavod, 1958.,
- [15] DAR JU 112, K 114
- [16] Kolacio, Z. (1961.1), *Stambeno naselje Ogranak u Rijeci*, "Arhitektura" 5-6, Zagreb
- [17] Kosier, S., Na Ogranku - najmoderniji trgovinski centar, Novi list, 23.7.1964
- [18] Novi list, 22.6.1958.
- [19] Sabol, I., Za milijun dinara jeftiniji stan, Novi list, 4.2.1959.
- [20] *** Počinje izgradnja prve montažne zgrade u Rijeci, Novi list, 21.1.1959.
- [21] Kolacio, Z. (1961.2), *Stambeno naselje "Turnić"*, "Arhitektura", 5-6, Zagreb,
- [22] Butković Mićin, L. (2013.), Ada Felice-Rošić i Nada Šilović - Ženski trag u arhitekturi, Muzej grada Rijeke,
- [23] Tušek, D. (1996.), *Arhitektonski natječaji u Splitu 1945.-1995.*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Društvo arhitekata Split,
- [24] *** Stanovi za tržište, Gradi se novo stambeno naselje "Autoput", Novi list 6.1.1964.
- [25] *** Naselje Autoput na Kantridi, Novi list 26.2.1960.
- [26] V.K., Zašto će se na Kantridi graditi neboderi od petnaest katova, Novi list, 8.3.1960.
- [27] Oglas o raspisu natječaja, Novi list, 6.5.1960.
- [28] M.B., Kako će izgledati novo naselje "Autoput" na Kantridi, Novi list, 30.10.1960.
- [29] *** Stanovi za blizu 7.000 obitelji, Novi list, 22.12.1969.
- [30] Serdinšek, D. (1978.), Organizacijsko-tehničke i financijske karakteristike dosadašnje stambene izgradnje u Rijeci, u: Studija stanovanja, Knjiga podataka, str. 16-55, Zavod za izgradnju Rijeke, OOUR Razvojno-urbanistički biro, Rijeka
- [31] Projekt stambenog naselja Autoput, DAR JU 169-1743
- [32] Frampton, K. (1992.), *Moderna arhitektura*, Globus nakladni zavod, Zagreb.

PROJEKT UNAPRJEĐENJA SUSTAVA DOSTAVE U SREDIŠTU GRADA RIJEKE

IMPROVEMENT OF GOODS DELIVERY SYSTEM IN RIJEKA CITY CENTER

Danijel Frka*, Srđan Škunca**

Sažetak

Europski projekt SMILE osmišljen je i proveden u razdoblju 2013. – 2015. godine kao oblik suradnje šest mediteranskih gradova: Barcelone, Bologne, Montpelliera, Pireja, Rijeke i Valencije s ciljem razvoja i primjene inovativnih strategija, planova i mjera usmjerenih na provedbu održivih prometnih rješenja dostave unutar gradskih središta. Provedba projekta je bila usmjerena na oblikovanje javnih strategija te provjeru i primjenu znanja i iskustava proizašlih iz suradnje privatnog i javnog sektora, primjene inteligentih tehnoloških i komunikacijskih rješenja i dr.

U sklopu provedbe SMILE projekta analizirano je stanje sustava dostave i mogućnosti njegovog unaprjeđenja unutar šireg središta grada Rijeke. Od 2005. godine, na ovom je području utvrđeno oko 80 mjesta rezerviranih za dostavu, a koja su analizirana u svijetlu zahtjeva i potreba korisnika, stanja prometne infrastrukture, pješačkih tokova i vrste roba obuhvaćenih dostavom te su utvrđene osobine, ali i slabe točke sustava. U cilju kreiranja i provedbe mjera za tehničko-tehnološko unaprjeđenje sustava, projekt je podijeljen u dvije faze: provedbu kratkoročnih mjera unutar pješačke zone Korzo-Stari grad te oblikovanje i provedbu dugoročnih mjera unaprjeđenja sustava dostave šireg gradskog središta. Kratkoročne mjere provedene su u pješačkoj zoni ugradnjom daljinski upravljanih stupića – pilomata. U cilju osmišljavanja dugoročnih mjera, temeljem ankete korisnika provedene krajem 2014. godine pokrenuta je izrada projekta unaprjeđenja sustava koji organizaciju novog sustava dostave zasniva na primjeni informatičke tehnologije u obliku postave informacijsko-kontrolnih totema na mjestima dostave radi maksimalne iskoristivosti postojeće i buduće prometne infrastrukture.

Ključne riječi: SMILE projekt, dostava, gradsko središte, IT prometna rješenja

* Rijekapromet, d.d., Fiumara 13, Rijeka,
E-mail: frka@riekapromet.hr

** Grad Rijeka, Titov trg 3, Rijeka,
E-mail: srdjan.skunca@rijeka.hr

Abstract

European Project SMILE has been designed and introduced in the period from 2013. - 2015. as a result of cooperation of six Mediterranean cities: Barcelona, Bologna, Montpellier, Piraeus, Rijeka and Valencia, aimed to develop and implement innovative strategies, plans and measures of sustainable transport solutions of delivery of products and goods in the city cores due to their numerous constraints regarding the number and structure of the functions and users of the city center facilities.

Being a component of the SMILE project, Rijeka analyzed the current state of the delivery system in the wider city center and the possibilities of its improvement. Within the described area, 80 locations reserved for delivery of goods have been used until 2005 and all of them were the target of a systematic analysis in terms of the current state shaped by needs and demands of users, transport infrastructure and pedestrian flows, range of goods to be delivered, general characteristics and weak spots of the delivery system. In order to propose measures of technical and technological improvements of the delivery system and their implementation, the Project was introduced in two phases.

In the first phase, Korzo-Stari grad pedestrian zone was placed under the full supervision by installing remotely controlled pillars – barriers. The second phase included analysis of the current state of the delivery system, based on the surveying of firms operating in the city center, and creation of long-term improvement measures which include an information-technology solution of placing special informational pylons to control the use of delivery locations.

Key words: *SMILE Project, delivery, city center, IT traffic solution*

1. Uvod

Suvremeni gradovi poklanjaju sve veću pažnju organizaciji dostave različitih roba i dobara unutar urbanog područja, a posebno raznovrsnim kategorijama korisnika koji žive i rade unutar užeg i šireg gradskog središta, blagodati kojih, istovremeno, privlače i brojne posjetitelje i goste. Međutim, radi brojnih zahtjeva koje nameću prostorno-prometna ograničenja gradskih središta, održavanje već uspostavljenih ekoloških zahtjeva i standarda, razvoj sustava pješačkih površina, potrebe različitih korisničkih skupina i dr., temeljni zadatak, tj. kako dostaviti robu krajnjem korisniku, razvi(ja)o se do razine uspostave *sustava gradske logistike* kojoj je temeljni zadatak optimizacija sustava opskrbe, odnosno dostave unutar gradskog područja kao sastavnog dijela kvalitete života u gradu, a bez negativnog utjecaja na razinu i kvalitetu distribucije [1]. O složenosti problema svjedoči i angažman Europske komisije koja u svom dokumentu *White Paper, Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System* iz 2011. godine u točki 33. poglavlja *Čisti urbani prijevoz i putovanje*, izriječno naglašava i problem opskrbe gradskih središta: *Cilj je ograničiti pojedinačne isporuke, najmanje učinkovit*

dio prijevoza, na najmanju moguću mjeru. Uporaba Inteligentnih Transportnih Sustava doprinosi upravljanju prometom u stvarnom vremenu, smanjenju vremena dostave i zagušenja u završnoj dionici dostave¹ [2]. Na tragu ovakvog opredjeljenja, u cilju daljnje provedbe spomenutog dokumenta, Europska komisija objavljuje 2012. godine završno izvješće *Studije o urbanom transportu tereta (UFT, Urban Freight Transport)* [3]. U oblikovanju politike rješavanja problema do 2050. godine, poseban naglasak stavljen je na Inteligentne Transportne Sustave (ITS) te njihovo korištenje, između ostalog, i u obliku kontroliranog pristupa gradskom središtu i rezervacije mjesta za ukrcaj/iskrcaj tereta unutar njega [3], ali i na poticanje razmjene „najbolje prakse“ između europskih gradova tj. modela opskrbe gradskog središta osmišljenih u međusobnoj suradnji gradskih vlasti i privatnog sektora [3].

Orijentirajući se na sredstva EU fondova, a s ciljem razvoja i primjene inovativnih strategija i provedbu održivih prometnih rješenja, skupina od šest mediteranskih gradova, Barcelone, Bologne, Montpelliera, Pireja i Rijeke, osmislila je europski projekt SMILE, (u daljnjem tekstu: Projekt) proveden u razdoblju od 2013. - 2015. godine. Uvažavajući prezentirane prakse brojnih europskih gradova² te uzimajući u obzir tehničke, financijske i druge mogućnosti pojedinog grada, u okviru provedbe Projekta zagovarala se i provedba pilot-projekata koji će unaprijediti postojeći sustav dostave, ali ujedno činiti prijelaz prema uspostavi inoviranog modela [4].

Grad Rijeka odlučio je poći od zatečenog sustava dostave, ali s ciljem osuvremenjavanja i unaprjeđenja istog, kako u cilju udovoljavanja potreba njegovih korisnika, tako i u cilju boljeg funkcioniranja dostave kao važnog podsustava gradske logistike i ukupnog prometnog sustava grada. Nositelji provedbe SMILE projekta u gradu Rijeci bili su Grad Rijeka, Odjel gradske uprave za razvoj, urbanizam, ekologiju i gospodarenje zemljištem, Regionalna energetska agencija REA i Rijeka promet, d.o.o. (tvrtka u 100%-tnom vlasništvu Grada Rijeke) zadužena za provedbu pilot-projekta i daljnje faze njegove provedbe.

2. Postojeći sustav dostave unutar središta Rijeke

U obliku u kojem još uvijek funkcionira, sustav dostave na području gradskog središta Grada Rijeke uspostavljen je 2005. godine donošenjem *Odluke o parkiranju vozila radi opskrbe na području Grada Rijeke* [5]. Sustav

¹ "The aim is to limit individual deliveries, the most 'inefficient' part of the journey, to the shortest possible route. The use of Intelligent Transport Systems contributes to real-time traffic management, reducing delivery times and congestion for last mile distribution."

² Tako je Berlin odlučio uvesti rikše i kurire, a Barcelona mikro-platforme na rubu gradskog središta na kojima se od različitih distributera preuzimaju različite pošiljke i pošta koje se potom električnim triciklima dostavljaju krajnjim korisnicima u gradskom centru [4].

dostave unutar područja gradskog središta: Trg kralja Tomislava - Cambierijeva - V.C. Emina - F. la Guardia - Pomerio - Žrtava fašizma - Grohovčeva - Školjić - Titov trg - Križanićeva - Strossmayerova - Cindrićeva - Wenzelova, temelji se na posebno označenim mjestima rezerviranim za parkiranje teretnih i dostavnih vozila (njih 80 od ukupno 110 na području šireg gradskog središta), a pozicije istih utvrđene su *Planom lokacija za parkiranje vozila radi opskrbe na području Grada* i elaboratom *Parkirališna mjesta dostave-novelacija*,³ koji čini sastavni dio Odluke [6]. Unutar opisanog područja dostava je moguća tijekom 24 sata, ali teretno vozilo može mjesto za dostavu koristiti najduže 30 minuta, što mora biti istaknuto i na prometnom znaku postavljenom na mjestu rezerviranom za dostavu [7].

S obzirom na desetljetnu praksu dostave, za provedbu Projekta SMILE uzeto je isto područje, ali prošireno područjima Središnje gradske tržnice i tržnice Brajda na kojima nisu označena mjesta rezervirana za dostavu.

3. Ciljevi provedbe Projekta u dogradnji sustava dostave

U realizaciji Projekta postavljena su dva glavna cilja:

- uspostava punog nadzora nad ulazima u zonu ograničenog prometa u pješačku zonu Korzo-Stari grad,
- dogradnja postojeće mreže lokacija za dostavu, uz prijedlog novih pravila za dostavu roba široke potrošnje, hrane, pića, lijekova i dr.

Glede prvog cilja, potrebno je napomenuti kako je pješačka zona Korzo-Stari grad, u kojoj nisu bila označena rezervirana mjesta za dostavu, sve do provedbe Projekta bila dostupna za bilo koju vrstu isporuke robe u gotovo neograničenom vremenu i količini te je takvo stanje bilo u trajnom sukobu s potrebama drugih korisnika zone.

Drugi cilj potrebno je sagledati u svjetlu promjena koje su se dogodile u gospodarstvu grada nakon 2005. godine i koje su se odrazile i na sustav dostave u gradskom središtu. Gašenjem određenog broja poslovnih subjekata, odnosno osnivanjem novih, djelomično je izmijenjena struktura korisnika, a time i vrste roba, uvjeti i okolnosti dostave, kao i struktura dostavnih vozila. Određeni broj mjesta postao je preopterećen, dio slabo korišten, a neke lokacije su u međuvremenu ukinute radi drugih potreba i aktivnosti u prometu. Projektom je bilo predviđeno snimanje i analiza zatečenog stanja sustava dostave u središtu grada s obzirom na potrebe korisnika, zahtjeve prometne ponude i potražnje, stanje prometne infrastrukture i pješačkih tokova (budući da se određeni broj mjesta rezerviranih za opskrbu nalazi i na nogostupima) i dr.

³ Plan lokacija iz 2002. u funkciji Odluke novelirao Rijekapromet d.d. u rujnu 2005.



Slika 4. Područje projekta s naznačenim brojem anketiranih tvrtki po anketnim sektorima

U cilju utvrđivanja postojećeg stanja izrađen je projektni zadatak [8] temeljem kojeg je Pomorskom fakultetu u Rijeci povjerena izrada analize stanja najvećeg dijela promatranog područja (Slika 1). Fakultet je proveo anketu pravnih osoba koje posluju u uredskim prostorima u središtu grada (bez obzira na vlasništvo istog) i prikupio brojne pouzdane i ažurne informacije o isporukama roba npr.: podatke o danima i vremenu isporuke robe, broju isporuka, mjestima i načinu dostave, tipovima dostavnih vozila, vrsti isporučene robe, i dr. [9].

Područje Projekta podijeljeno je u anketne sektore unutar kojih su podaci prikupljeni izravnim obilaskom 430 pravnih osoba. Najveći broj tvrtki, njih više od 50%, prema NACE klasifikaciji bavi se trgovinom na veliko i malo te pružanjem smještaja i usluga usluživanja hrane, a potom slijede tvrtke iz proizvodnje i djelatnosti kućanstava. S obzirom na ukupno 550 pravnih osoba koje posluju u istom području, nedvojbeno je kako je istraživanjem obuhvaćen reprezentativan i vjerodostojan uzorak, radi čega se i rezultati ankete mogu smatrati pouzdanima.

Analiza ankete ukazala je na sljedeće glavne osobine postojećeg sustava dostave gradskog središta.

U okviru redovitih djelatnosti 81,63% pravnih subjekata je koristilo usluge dostave. Više od petine tvrtki (22%) nema saznanja o postojanju propisanih lokacija za dostavu, a posebno se ističu one locirane oko Jadranskog trga od kojih preko 50% ne zna za postojanje propisane lokacije za dostavu, iz čega proizlazi da koriste proizvoljno odabrana

mjesta na prometnicama ili javno-prometnim površinama na kojima dostavu obavljaju.

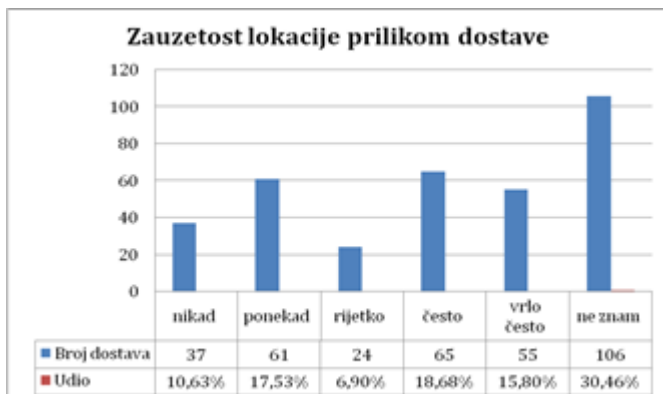
Propisano i obilježeno gradsko mjesto dostave koristi 40% tvrtki. Međutim, pretežiti broj tvrtki za dostavu rabi druge javne površine (u pravilu kolnike i pločnike ispred lokala/zgrade ili autobusne postaje i ugibališta) jer vrlo mali broj njih posjeduje vlastite površine u gradskom središtu (Slika 2). Ovako visoki udio može se dovesti u vezu s više od 1/3 odgovora o čestoj ili vrlo čestoj zauzetosti lokacije potrebne za dostavu (detaljnija analiza pokazuje kako je riječ o lokacijama za dostavu u Starom gradu, Brajdi - područje Ul. F. la Guardia te oko glavne tržnice i HNK "Ivan pl. Zajc"), dok odgovor jednakog broja anketiranih upućuje na dobra iskustva jer je lokacija potrebna za dostavu bila raspoloživa ili rijetko zauzeta (Slika 3).

Za dostavu se najviše koriste veća (42%) i manja (34%) teretna vozila, automobili (14%) i kamioni (10%) (Slika 4). Ručno se do poslovnog objekta dostavlja u 50% slučajeva, dok se u 47% slučajeva rabe kolica. Viličar se rabi u dostavi samo u 2,2% slučajeva. Struktura vozila upućuje na dva važna zaključka: dominacija dostavnih vozila do veličine kombija otvara mogućnost uspješne prilagodbe sustava za upravljanje dostavom, dok mali udio kamiona ukazuje kako je moguće za svaku tvrtku pojedinačno naći povoljno rješenje za lokaciju za dostavu, pogotovo stoga što tvrtke koje u dostavi rabe kamione, istovremeno dodatno koriste i dostavna vozila.

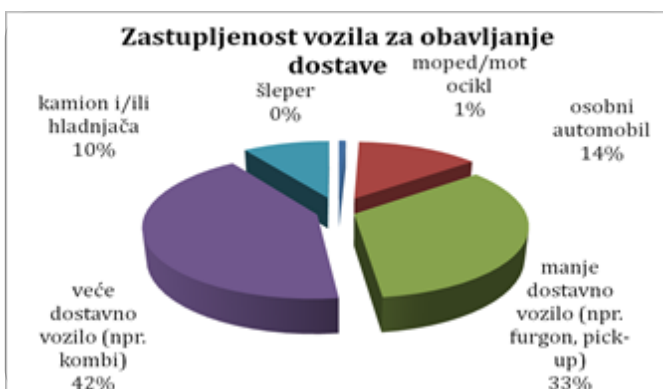
Najveći broj dostava, ukupno 55%, obavlja se tijekom prva tri dana radnog tjedna, pri čemu je najopterećeniji dan ponedjeljak (27%) (Slika 5). Jednom ili više puta dnevno obavi se 22% svih dostava, a one obuhvaćaju prehrambene proizvode, smrznute proizvode i alkoholna pića. U tjednom ritmu (44% dostava) najviše se dostavljaju odjeća i obuća, uredski materijal i predmeti za njegu tijela te predmeti za osobnu upotrebu. Najmanji je broj mjesečnih dostava (11%) koje najčešće obuhvaćaju odjeću i obuću te uredski material (Slika 6).



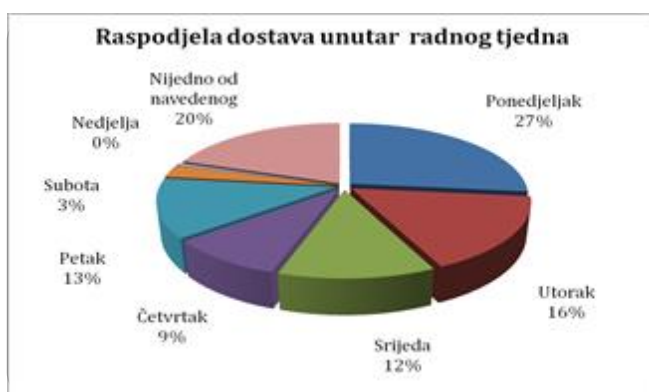
Slika 5. Grafički prikaz smještaja vozila tijekom dostave



Slika 6. Grafički prikaz zauzetosti raspoloživih mjesta prilikom obavljanja dostave



Slika 7. Grafički prikaz zastupljenosti dostavnih vozila prema tipu



Slika 8. Grafički prikaz učestalosti dostave tijekom radnog tjedna opskrbe



Slika 9. Grafički prikaz učestalosti dostave unutar gradskog središta



Slika 10. Grafički prikaz vremena dostave tijekom 24-satnog razdoblja

Može se, dakle, zaključiti kako je sustav dostave u centru grada Rijeke potrebno unaprijediti i poboljšati, kako povećanjem broja propisanih lokacija za potrebe dostavnih vozila, tako i promjenom vremena dostave jer je utvrđeno kako se gotovo 60 % svih dostava unutar gradskog središta odvija u vremenu od 8 - 12 sati, dok se značajni udio dostava odvija i u razdoblju od 6 - 8 te od 14 - 16 sati i tako dodatno opterećuje protočnost prometa u središtu grada (Slika 7).

4. Mjere unaprjeđenja sustava dostave gradskog središta

Prepoznavanje slabih točaka sustava bila je osnova za predlaganje mjera za njegovo tehničko-tehnološko unaprjeđenje, pri čemu je oslanjanje na suvremena inteligentna transportna rješenja iz domene informatičke tehnologije jedino dugoročno pouzdano i prihvatljivo budući da su slična rješenja već u uporabi u segmentu prometne regulacije.

4.1. Provedba pilot-projekta – ugradnja hidrauličkih podiznih stupića

U sklopu kratkoročnih mjera, proveden je pilot-projekt ugradnje hidrauličkih podiznih stupića radi uspostave pune kontrole pristupa pješačkoj zoni Korzo-Stari grad. Ovu zonu, kao dio najužeg gradskog središta, odlikuje visoka koncentracija trgovačkih, ugostiteljskih, javnih, zabavnih i drugih sadržaja koji privlače velik broj korisnika, ali i učestala dostava različitih vrsta roba. U nedostatku učinkovite kontrole pristupa u zoni je vladao kaos te su stoga duž Adamićeve ulice ugrađeni hidraulički podizni stupići na dva mjesta pogodna za pristup vozila opskrbe, interventnih i vozila komunalnih službi: na spoju ulica Adamićeva-Korzo-Starčevićeva, te na spoju Adamićeva-Trg 128. brigade HV (Slika 8).



Slika 11. Nove daljinski nadzirane automatske barijere (hidraulički stupići) postavljene u sklopu provedbe projekta

Nakon ugradnje nove opreme te testiranja i puštanja u rad spriječen je neovlašteni ulazak vozila u zonu ograničenog prometa; daljinskim nadzorom i upravljanjem omogućeno je aktiviranje (spuštanje) stupića i time pristup samo ovlaštenom korisnicima, čime je uveden red na predmetnom području (Slika 9).



Slika 12. Zona ograničenog prometa Korza i Starog grada. Žuto su označene nove daljinski nadzirane automatske barijere (hidraulički stupići)

4.2. Izrada projekta unaprjeđenja sustava dostave

Polazeći od rezultata analize ankete prišlo se oblikovanju i utvrđivanju budućeg optimalnog rješenja sustava dostave roba u središtu grada koje će u najmanjoj mogućoj mjeri opterećivati promet i prometnu infrastrukturu. Stoga je temeljem projektnog zadatka [10] s Institutom IGH d.d. - PC Rijeka početkom ožujka 2015. godine ugovorena izrada *Projekta unaprjeđenja sustava opskrbe u Gradu Rijeci* [11]. Prioritetni zadatak bio je utvrditi nova mjesta dostave roba koja optimalno mogu opsluživati više poslovnih subjekata u blizini, ali i ocijeniti za koja od postojećih mjesta dostave ne postoji razlog zadržavanja u sustavu.

U tom cilju pregledana su postojeća mjesta dostave, svako od njih je fotodokumentirano i popisani su poslovni subjekti-trgovine na udaljenosti do najviše 100 m. Terenski obilazak je trajao 10 dana te je uočeno kako se mjesta dostave koriste na razne načine, a ista se odvija na svakom slobodnom mjestu što bliže korisniku, što je bio povod i za utvrđivanje novih mjesta dostave (Slika 10). S druge strane, javne površine su u međuvremenu dodatno zauzete višestruko povećanim brojem spremnika za razvrstavanje otpada (na žalost bez promišljenog projekta), radi čega su zauzimana i parkirna mjesta za naplatu i za dostavu (Slika 11). Uočeno je i nekoliko mjesta dostave uz poslovne prostore koji se ne koriste, ali je zaključeno da iste ne treba ukinuti jer je riječ o lokacijama za koje ipak postoji mogućnost interesa zakupoprimaca.



Slika 13. Obavljanje opskrbe na predviđeni način, na uređenom parkirnom mjestu



Slika 14. Primjer neracionalnog zauzeća površine za dostavu kontenjerima za otpad

Višekratnim obilascima područja zapaženo je i korištenje mjesta dostave za dugotrajno parkiranje dostavnih i osobnih vozila korisnika istog, čiju pojavu nije lako prevenirati. Naime, radi ograničenog broja djelatnika prometnog redarstva, nadzor korištenja mjesta dostave nije prioritet, a odvoženje luksuznih automobila „paukom“ nije često radi mogućnosti oštećenja takvih vozila. Sukladno utvrđenim potrebama, a temeljem rezultata provedene ankete, nova dostavna mjesta predviđena su u Trpimirovoj ulici, Adamićevoj, Matije Gupca, Fiumari i Đure Šporera. Ostala mjesta su zadržana u gabaritima u kojima i sada postoje, a ukida se samo jedno mjesto, i to u Splitskoj ulici, jer su obližnji uslužni prostori u međuvremenu prestali s radom. Projektom se dodatno predviđa uređenje novih parkirnih mjesta dostave u Demetrovoj ulici te njeno rezerviranje za prometovanje samo za vozila za opskrbu.

4.2.1. Prijedlog naprednog ITS rješenja

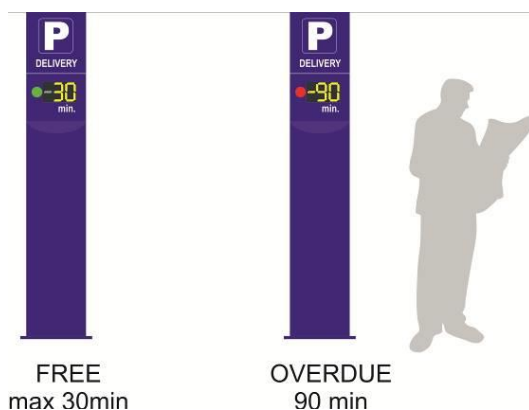
Tehnološkim rješenjem želi se uspostaviti učinkovito i kontrolirano korištenje mjesta dostave uz zadržavanje propisanog vremena od 30 minuta po korisniku, budući da je toliko vrijeme dosadašnjom uporabom široko prihvaćeno, ali i ocijenjeno optimalnim za svaki oblik dostave, kao i jednostavnije izdavanje kazne za prekršitelje pravila.

Rješenje podrazumijeva tri faze razvoja. Osnovna, *prva faza* uključuje instaliranje određenog broja uređaja koji pokrivaju po 2 dostavna parkirna mjesta (Slika 12). Svaki uređaj opremljen je informatičkim LED zaslonom i semaforom na kojemu se zelenim svjetlom i numeričkim odbrojanjem vremena korištenja omogućuje uredno izvršenje dostave. Po isteku dozvoljenog vremena od 30 minuta pali se crveno svjetlo, započinje odbrojanje minuta prekoračenja koje se iskazuje na zaslonu i pokreće se automatska dojava prometnom redarstvu o prekršaju, kako bi najbliži prometni redar što brže intervenirao. Podaci o radu prenose se ručno putem

memorijske kartice u centralno računalo. Programska podrška selektira podatke i pohranjuje ih u centralnu bazu podataka. Selekcija se vrši prema:

- pojedinoj lokaciji (automatu),
- tipu podatka, podacima o korištenju, servisnim podacima,
- vremenskom periodu.

Programska podrška mora imati mogućnost ispisa i selekcije podataka prema zahtjevima naručitelja. Izrada statističkih podataka za zadani vremenski period mora biti izrađena za svako dostavno mjesto pojedinačno, zadanu skupina automata, zonu prema zadanim parametrima, cjelokupni sustav.



Slika 15. Izgled stupa s informacijskim zaslonom s osnovnim podacima o zauzetosti mjesta dostave - zeleno svjetlo za dostavu unutar dozvoljenog vremena te crveno svjetlo s minutama prekoračenja dozvoljenog vremena za dostavu od 30 minuta

Druga faza obuhvaća umrežavanje automata u centralni sustav upravljanja i kontrole popunjenosti mjesta dostave putem LAN POWER NET uređaja i GSM data uređaja. Grupa uređaja komunicira s centralnim računalom putem GSM 2G/3G/4G uređaja. Programska podrška omogućuje prikupljanje svih podataka u centralno računalo te njihov vizualni prikaz u nadzornom centru. Centralno računalo selektira i distribuira dio podataka na mobilne uređaje kontrolora na terenu prema zahtijevanim parametrima od strane naručitelja. Programska kontrola mora biti izrađena za standardne mobilne uređaje (telefon, tablet).

Treća faza podrazumijeva ugradnju LPR sustava čitanja tablica vozila i distribuciju podataka u centralni sustav upravljanja i kontrole popunjenosti parkirnih mjesta dostave. Obradeni podatak o registarskim oznakama prekršitelja automatski se distribuira u postojeći sustav prometnog redarstva radi izravne penalizacije, odnosno izdavanja kazne u slučajevima

naknadne penalizacije. Dovršetakom treće faze ostvaruje se cjeloviti sustav upravljanja mrežom mjesta za dostavu te omogućuje stvaranje baze podataka temeljem koje je moguće analizirati učinkovitost mreže i sustava, kreirati nadogradnju sustava, statističke pokazatelje i dr.

Vremenski okvir provedbe sve tri faze definiran je financijskim uvjetima odnosno mogućnostima Grada Rijeke, kao i mogućnostima povlačenja sredstava iz odgovarajućih EU fondova, a s obzirom na korištenje napredne IT tehnologije i višestruke pozitivne učinke na stanje okoliša i unaprjeđenje urbanog ambijenta.

4.2.2. Prijedlog normativnih rješenja

Inoviranje tehničkog i informatičkog segmenta bit će neophodno popratiti i doradama važećih akata kojima je ovo područje regulirano, prvenstveno Odluke o opskrbi grada Rijeke [5]. Naime, razmatranje učestalosti opskrbe ukazuje na mogućnost da se dostava u 24-satnom razdoblju ograniči vremenskim okvirima sukladno prioritetima i osobinama same robe te potrebama korisnika, a da se istovremeno ne preoptereće pojedine lokacije za dostavu koje služe i drugim poslovnim subjektima.

Također, potrebno je razmotriti i mogućnost da dopuštenje za pristup parkirnim mjestima za isporuku robe dobiju samo licencirana dostavna vozila kako bi se u cijelosti onemogućile zloporabe korištenja mjesta za dostavu za zadržavanje osobnih vozila (budući da se korištenje označenih mjesta za dostavu ne naplaćuje), kao i poticajne mjere za korištenje ekovozila za opskrbu sa smanjenom emisijom CO₂.

5. Zaključak

Uključenje Grada Rijeke u Projekt SMILE bilo je korisno u ocjeni mogućnosti unaprjeđenja postojećeg sustava dostave unutar gradskog središta i u cilju podizanja njegove ekološke kvalitete, umanjenja ili potpunog uklanjanja konflikta s prometnim sustavima i korisnicima javnih i pješačkih površina te zadržavanja potrebne razine usluge krajnjim korisnicima. Sveobuhvatnom anketom širokog spektra korisnika, ugostitelja, trgovaca, uslužnih tvrtki te raznih ustanova, utvrđena je ponuda i potražnja te proveden pilot-projekt, tj. uspostava potpune kontrole dostave unutar pješačke zone Korzo-Stari grad. Unaprjeđenje sustava dostave u središtu grada osmišljeno je zasebnim projektom kojim su definirane potrebe za opskrbom, utvrđena nova shema parkirnih mjesta opskrbe te izrađeno idejno rješenje naprednog informatičkog sustava nadzora korištenja parkirnih mjesta dostave s ciljem povećanja njihove dostupnosti kao i učinkovitosti nadzora u korištenju istih i provedbi gradskih odluka koje će biti potrebno usklađivati sukladno dinamici daljnje

provedbe planiranih unaprjeđenja. U sljedećoj fazi implementacije projekta bit će neophodno pronaći financijska sredstva za makar djelomičnu uspostavu sustava u segmentu primjene informatičkog sustava u označavanju i korištenju mjesta dostave.

Literatura

- [1] Kolarić, G., Skorić, L., Metode distribucije u gradska središta, Tehnički glasnik/Technical journal 8, 4(2014): 405-412, Sveučilište Sjever, Koprivnica, 2014.
- [2] [www.http://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/ALL/?uri=CELEX:52011DC0144](http://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/ALL/?uri=CELEX:52011DC0144)
- [3] DG MOVE European Commission: Study on Urban Freight Transport FINAL REPORT By MDS Transmodal Limited in association with Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL) Date: April 2012 Ref: 210041R4_final report, [www.http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/studies/doc/2012-04-urban-freight-transport.pdf](http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/studies/doc/2012-04-urban-freight-transport.pdf)
- [4] www.smile-urbanlogistics.eu/projects
- [5] Odluka o parkiranju vozila radi opskrbe na području Grada Rijeke, Službene novine Primorsko-goranske županije 55/09, 56/10
- [6] Dio 2, br. 5500-1-514693/2, IGH, Poslovni centar Rijeka, 2002.
- [7] Odluka o uređenju prometa na području Grada Rijeke, (Službene novine Primorsko-goranske županije 33/13, Službene novine Grada Rijeke 3/15)
- [8] Projektni zadatak za provedbu ispitivanja i anketiranja korisnika sustava dostave u Rijeci, Regionalna energetska agencija REA, ožujak 2014.
- [9] Anketa o potrebama isporuke u centru grada Rijeke, Pomorski fakultet u Rijeci, 29.11.2014.
- [10] Projektni zadatak za izradu Projekta poboljšanja sustava dostave u centru Rijeke, Rijeka promet d.d., 18.12.2014.
- [11] Projekt poboljšanja urbanog sustava dostave u centru Rijeke, broj 3600-0147/15-750, Institut IGH PC Rijeka, 2015.

ODRŽIVO GOSPODARENJE OTPADOM NA OTOCIMA – PRIMJER OTOKA KRKA

SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT ON ISLANDS – AN EXAMPLE OF THE ISLAND OF KRK

Koraljka Vahtar-Jurković*, Ivan Kušt**

Sažetak

Jedna od najvažnijih tema u području zaštite okoliša je zbrinjavanje otpada. Republika Hrvatska je tijekom proteklih dvadeset godina razvila pravni okvir za održivo gospodarenje otpadom te donijela odgovarajuće dokumente gospodarenja otpadom – državnu strategiju i plan gospodarenja otpadom. U skladu s njima i za područje Primorsko-goranske županije donesen je Plan gospodarenja otpadom te se radilo na izgradnji cjelovitoga sustava gospodarenja otpadom. Posebno osjetljivo pitanje je ono gospodarenja otpadom na otocima na kojima, sukladno važećoj regulativi i dokumentima, nije dozvoljeno odlaganje otpada. Stoga se u radu analizira ekološki zasnovan sustav zbrinjavanja komunalnog otpada koji su jedinice lokalne samouprave otoka Krka razvile tijekom proteklih deset godina. Usporedbom s ranijom situacijom i drugim kvarnerskim otocima, zaključuje se o učincima ovoga vrijednog pilot-projekta za održivo gospodarenje otpadom na području Primorsko-goranske županije i zaštitu okoliša u cjelini.

Ključne riječi: zaštita okoliša, održivo gospodarenje otpadom, Primorsko-goranska županija, otok Krk, projekt Eko otok Krk

Abstract

One of the most important topics in the field of environmental protection is waste disposal. In the past twenty years the Republic of Croatia has developed a legal framework for sustainable waste management and issued relevant documents of waste management - the national strategy and waste management plan. In accordance with them The County of Primorje and Gorski kotar passed the waste

* Primorsko-goranska županija, Upravni odjel za prostorno uređenje, graditeljstvo i zaštitu okoliša, Rijeka, Slogin kula 2

E-mail: koraljka.vahtar-jurkovic@pgz.hr

** „Inženjering-komerc“ d.o.o. Krk, Omišaljska 32

E-mail: ivosivo0@gmail.com

management plan and worked on the integrated waste management system. Waste management on the islands is a particularly sensitive issue because in accordance with current regulations and documents, the disposal of waste on the islands is forbidden. Therefore, this paper analyzes system of municipal waste management that the local government of the island of Krk has developed over the past ten years. Compared to the previous situation and other islands of Kvarner, the paper offers conclusions on the effects of this valuable pilot project for sustainable waste management in the area of Primorje and Gorski Kotar and environmental protection in general.

Key words: *environmental protection, sustainable waste management, The County of Primorje and Gorski Kotar, the island of Krk, the project Eco Island Krk*

1. Uvod

Pritisak na okoliš otpadom jedan je od glavnih problema u zaštiti okoliša suvremenog svijeta pa tako i u Hrvatskoj. Stoga je društvo moralo pripremiti odgovarajuće odgovore u obliku pravne regulative i dokumenata zaštite okoliša te posebno dokumenata gospodarenja otpadom, kao i poduzeti konkretne aktivnosti kako bi se negativan utjecaj otpada smanjio na najmanju moguću mjeru.

Republika Hrvatska je u procesu pripreme za ulazak u Europsku uniju preuzela brojne obveze radi implementacije europske pravne stečevine u vezi sa zaštitom okoliša i gospodarenjem otpadom. Prvi Zakon o otpadu s nizom podzakonskih propisa donesen je 1995. godine. Danas je u primjeni Zakon o održivom gospodarenju otpadom donesen 2013. godine, a u međuvremenu su bila na snazi još dva zakona o otpadu. Temeljem ovih propisa donesena su dva osnovna dokumenta gospodarenja otpadom državne razine - Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske 2005. godine i Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske 2007. godine. Ovim su propisima i dokumentima postavljene osnove pravilnog postupanja s otpadom od njegova nastanka do konačnog zbrinjavanja na državnoj, županijskoj i lokalnoj razini te su propisane obveze svih sudionika u gospodarenju otpadom, kao i osnove dokumentiranja tijekom postupanja s otpadom u sklopu informacijskog sustava gospodarenja otpadom.

Primorsko-goranska županija je od samog osnivanja počela raditi na provedbi propisa u vezi sa zaštitom okoliša i gospodarenjem otpadom pa je putem svojih nadležnih odjela i Zavoda za održivi razvoj i prostorno planiranje radila na analizi postojećeg stanja i izradi planskih dokumenata radi izgradnje novoga suvremenog sustava gospodarenja otpadom, istodobno provodeći aktivnosti radi sanacije postojećeg stanja i izgradnje centralne zone za gospodarenje otpadom i drugih elemenata budućeg sustava. Godine 2005. donesena je županijska Strategija zaštite okoliša

kojom je na temelju višekriterijske analize gospodarenje otpadom utvrđeno prioritetom u zaštiti okoliša [1], a 2007. Plan gospodarenja otpadom do 2015. godine. Županija je, sukladno zakonskim obvezama o provedbi Plana redovito obavještavala Županijsku skupštinu i javnost putem godišnjih Izvješća o gospodarenju otpadom.

U svim navedenim dokumentima državne i županijske razine posebno je obrađena problematika gospodarenja otpadom na otocima pa je tema ovoga rada ukazati na njezine specifičnosti te analizirati postavke i učinke ekološki zasnovanog sustava razvijanog tijekom proteklih desetak godina na otoku Krku.

2. O gospodarenju otpadom

2.1. Definicija i kategorije otpada

Otpad je svaka tvar ili predmet koju posjednik odbacuje, namjerava ili mora odbaciti [2]. Razvrstava se prema svojstvima na opasni, neopasni i inertni te prema mjestu nastanka na komunalni, proizvodni i na posebne kategorije otpada (biootpad, otpadna ambalaža, gume, ulja, baterije i akumulatori, otpad koji sadrži azbest, građevni otpad, morski otpad i dr.). Preduvjet pravilnog postupanja s otpadom je poznavanje njegovih svojstava i mjesta nastanka, odnosno ključnog broja otpada, o čemu ovise i preporučeni postupci obrade [3].

2.2. Gospodarenje otpadom

Suvremeno gospodarenje otpadom je skup aktivnosti, odluka i mjera usmjerenih na sprječavanje nastanka otpada, smanjivanje količina otpada i/ili njegova štetnog utjecaja na okoliš – skupljanje, prijevoz, uporaba, zbrinjavanje i druge djelatnosti u vezi s otpadom te nadzor nad tim djelatnostima, kao i skrb za zatvorena odlagališta. Najvažnije je pri tome ne dovoditi u opasnost ljudsko zdravlje i koristiti postupke koji ne štete okolišu te osigurati da otpad koji preostane nakon postupaka obrade i koji se zbrinjava odlaganjem ne predstavlja opasnost za buduće generacije. Prilikom gospodarenja otpadom primjenjuju se: načelo kojim onečišćivač plaća (proizvođač otpada snosi troškove gospodarenja), načelo blizine obrade otpada (obrada otpada mora se obavljati u najbližoj odgovarajućoj građevini ili uređaju u odnosu na mjesto nastanka otpada, uzimajući u obzir gospodarsku učinkovitost i prihvatljivost za okoliš), načelo samodostatnosti (otpadom treba gospodariti tako da se omogući neovisno ostvarivanje propisanih ciljeva na razini države, uzimajući u obzir zemljopisne okolnosti ili potrebu za posebnim građevinama za posebne kategorije otpada) i načelo sljedivosti tokova otpada (mora se utvrditi porijeklo otpada s obzirom na

proizvod, ambalažu i proizvođača tog proizvoda, kao i posjed tog otpada uključujući i obradu). U gospodarenju otpadom primjenjuje se prvenstveni red u kojemu su prevencija kroz edukaciju i izbjegavanje nastajanja otpada temelji na koje se nadovezuje ponovna upotreba, recikliranje i uporaba otpada, a na kraju je zbrinjavanje preostalog dijela otpada [2].

2.3. Sudionici u gospodarenju otpadom

Sudionici u gospodarenju otpadom su proizvođači i uvoznici otpada, tvrtke za gospodarenje otpadom – komunalna društva, ovlašteni skupljači i obrađivači otpada, konzultantske tvrtke, strukovne organizacije te upravna tijela državne, županijske i lokalne razine: Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, županijski upravni odjeli nadležni za zaštitu okoliša te upravni odjeli gradova i općina.

2.4. Informacijski sustav gospodarenja otpadom

Informacijski sustav gospodarenja otpadom dio je cjelovitog sustava informacija u zaštiti okoliša, a sadrži podatke o količinama, vrstama i tokovima otpada, podatke o dozvolama za obavljanje djelatnosti skupljanja, uporabe i/ili zbrinjavanja otpada, podatke o građevinama za gospodarenje otpadom, podatke o uvozu, izvozu i provožu otpada, podatke o propisima koji reguliraju gospodarenje otpadom te podatke o stanju na području otpada. Informacijski sustav vodi Hrvatska agencija za prirodu i okoliš, a podatke za potrebe njegova vođenja dostavljaju svi sudionici u gospodarenju otpadom, prvenstveno nadležna tijela jedinica lokalne i regionalne samouprave te pravne osobe s javnim ovlastima.

2.5. Gospodarenje otpadom na otocima

U dokumentima gospodarenja otpadom posebno je zbog određenih specifičnosti naglašena problematika gospodarenja otpadom na otocima. Prije svega, radi se o velikim oscilacijama u količinama otpada tijekom godine jer su jadranski otoci ljeti opterećeni velikim brojem gostiju koji zajedno sa stalnim stanovnicima stvaraju iznimno velike količine otpada, prvenstveno ambalažnog. Nadalje, na otocima sukladno važećim propisima te Strategiji i Planu gospodarenja otpadom Republike Hrvatske nije dozvoljeno trajno odlagati otpad [4, 5]. Zato se sav otpad mora skupiti i prevesti do službenih odlagališta.

3. Gospodarenje otpadom na otocima Primorsko-goranske županije

Na području Primorsko-goranske županije su četiri otočne skupine – otoka Krka, Cresa, Lošinja i Raba, svaka s više manjih naseljenih ili nenaseljenih otoka. Na svakome većem otoku je po jedno postojeće odlagalište komunalnog otpada: Treskavac na Krku, Pržić na Cresu, Kalvarija na Lošinju i Sorinj na Rabu, kojima gospodare komunalna društva Ponikve eko otok Krk iz Krka (do 2014. te poslove obavljalo je komunalno društvo Ponikve), Komunalne usluge Cres Lošinj (do 2014. te je poslove obavljalo komunalno društvo Vodovod i čistoća Cres Mali Lošinj) i Dundovo Rab (do 2014. te je poslove obavljalo komunalno društvo Vrelo). Ova društva ujedno skupljaju komunalni otpad, a za područje Općine Lopar to čini komunalno društvo Lopar Vrutak iz Lopara. Skupljanjem otpada obuhvaćeno je gotovo 100% stanovništva. Poseban je problem skupljanje otpada brodicama s manjih i udaljenih otoka lošinjskog arhipelaga – Suska, Unija, Ilovika i Srakana, naročito ljeti, zbog brojnih turista i nautičara. Podaci o količinama sakupljenog komunalnog otpada na otocima Primorsko-goranske županije u razdoblju 2008.-2011., preuzeti iz godišnjih županijskih izvješća o gospodarenju otpadom, prikazani su u Tablici 1 [6].

Tablica 1. Količina sakupljenog komunalnog otpada na otocima Primorsko-goranske županije 2008. – 2011. [6]

Komunalno društvo	Količina sakupljenog komunalnog otpada			
	2008.	2009.	2010.	2011.
Ponikve, Krk	18.978 t	18.223 t	18.134 t	17.829 t
Vodovod i čistoća Cres Mali Lošinj	31.974 t	28.917 t	30.580 t	22.181 t
Vrelo, Rab	10.269 t	7.120 t	6.665 t	9.427 t
Lopar Vrutak, Lopar	-	-	3.309 t	2.514 t
Ukupno	61.221 t	54.260 t	58.688 t	51.951 t

Prema Planu gospodarenja otpadom Primorsko-goranske županije, odvojeno sakupljeni otpad s otoka ubuduće će preuzimati komunalna društva i odvoziti ga do transfer-stanica gdje će mu se smanjiti volumen te će se prepakirati u veća vozila kojima će se samo otpad koji preostane nakon odvajanja onoga za obradu, reciklažu i oporabu prevesti do županijskog centra za gospodarenje otpadom na Marišćini u Općini Viškovo. Transfer-stanice će biti na lokacijama dosadašnjih službenih odlagališta komunalnog otpada. Jedno od najvažnijih obilježja novoga sustava bit će plaćanje usluge gospodarenja otpadom prema količini otpada. Nakon puštanja u redovan

rad županijskog centra za gospodarenje otpadom, sva će se postojeća odlagališta zatvoriti i sanirati, za što su već izrađene stručne podloge i provedeni postupci procjene utjecaja na okoliš [7].

U prijelaznome razdoblju, do dovršetka izgradnje i puštanja u redovan rad centra na Marišćini, otpad se zbrinjavao na postojećim odlagalištima u skladu s mjesnim prilikama te se radilo na uspostavi novoga sustava gospodarenja otpadom, kao i pripremi dokumentacije za izgradnju reciklažnih dvorišta i transfer-stanica te sanaciju odlagališta.

Jedan od najvažnijih ciljeva novoga sustava je smanjenje količine proizvedenog otpada. Stoga se posljednjih desetak godina ulažu naponi za uspostavu selekcije i odvojenog prikupljanja pojedinih vrsta otpada. Još 2005. su na području grada Malog Lošinja postavljeni posebni spremnici za staklo, papir i baterije, a proveden je i pilot-projekt prikupljanja alu-doza i PET-ambalaže, dok su na otoku Rabu započeli s odvojenim prikupljanjem kartonske ambalaže, metalnog otpada i stakla [8]. Najdalje je u pripremanju za uspostavu novoga sustava gospodarenja otpadom otišao otok Krk uspostavom sustava *Eko otok Krk*.

4. Projekt *Eko otok Krk*

Temelji ekološkog sustava gospodarenja otpadom na otoku Krku postavljeni su u dogovoru svih sedam jedinica lokalne samouprave otoka Krka prije dvadesetak godina, a potaknuti su nedostatkom odlagališnog prostora na odlagalištu Treskavac i neodgovarajućim postupanjem s otpadom na samome odlagalištu. Tada se otpad na mjestu nastanka nije odvajao te se takav prikupljao i odvezio na odlagalište na kojemu su 1990.-ih godina bili česti požari. Odlagalište nije bilo ograđeno niti je bio uređen protupožarni put oko odlagališta, a otpad se nije sustavno prekrivao inertnim materijalom. U suradnji Komunalnog društva Ponikve te županijskih stručnih i inspekcijskih službi, stanje se tijekom niza godina polagano usklađivalo s propisima iz područja gospodarenja otpadom [8].

Godine 2003. izrađena je stručna studija budućeg sustava zbrinjavanja komunalnog otpada koji se bazirao na odvajanju otpada na mjestu nastanka. Sustav je projektiran i dimenzioniran prema podacima o količinama, sastavu i svojstvima otpada, ali i prema podacima o broju stanovnika po naseljima i općinama, broju sezonskih i vikend posjetitelja, korisnicima vikendica te broja gostiju hotela i kampova [9].

4.1. Elementi sustava

Radi skupljanja razvrstanog otpada nabavljeno je i na 1.500 lokacija širom otoka postavljeno 8.000 posuda za odvojeno prikupljanje papira, bio-

otpada, PET ambalaže, stakla i drugih vrsta otpada – to su eko-otoci ili sabirna mjesta (SAM). Za skupljanje glomaznog kućnog otpada uređena su posebna sabirna mjesta (POSAM), odnosno reciklažna dvorišta – po jedno u svakoj jedinici lokalne samouprave. Na reciklažnim dvorištima besplatno se zbrinjava i problematični (opasni) otpad: baterije i akumulatori, otpadno ulje, lijekovi, ostaci kemikalija (herbicidi, insekticidi, fungicidi, sredstva za čišćenje i njihova prazna ambalaža), boje i lakovi i njihova prazna ambalaža, posude pod tlakom (sprejevi, dezodoransi, lakovi), žarulje (fluorescentne cijevi i štedljive žarulje). Na posebnim sabirnim mjestima se od građana otkupljuje ambalaža za koju im se isplaćuje naknada od 0,50 kn po komadu (PET, staklo, aluminijski), a u suradnji s tvrtkom Metis d.d., na posebnom sabirnom mjestu u Krku od 2010. godine organiziran je otkup metala (bakar, mesing, bronca, aluminijski, cink, olovo, željezo). Posebnost je mogućnost skupljanja bio-otpada i većih količina zelenog otpada koji se kompostira na odlagalištu Treskavac, a građani u proljeće dobivaju tamo dobiveni kompost koji mogu koristiti u svojim vrtovima i cvjetnjacima.

Odlagalište Treskavac (Slika 1) je prošireno i modernizirano izgradnjom hale za prihvatanje komunalnog otpada u kojemu se obavlja prihvatanje, selekcija, baliranje i skladištenje sekundarnih sirovina (Slika 2).



Slika 1. Odlagalište Treskavac nakon sanacije [11]

Osim toga, izgrađena je novouređena ploha za prihvatanje dijela komunalnog otpada koji se ne može reciklirati ili oporabiti, s temeljnim brtvenim slojem i sustavom za odvodnju procjednih voda. Izgrađeni su i bazeni za procjedne i tehnološke vode. Odlagalište je i ranije udovoljavalo

osnovnim propisanim uvjetima u smislu ograđenosti i protupožarnog puta, kontrole ulaza, kao i kontrole sadržaja i količina otpada. Odloženi otpad se redovito prekriva inertnim materijalom [10].



Slika 2. Hala za prihvat i razvrstavanje otpada sa kompostanom [11]

4.2. Edukacija

Tijekom cjelokupnog trajanja projekta *Eko otok Krk* kontinuirano su se provodile aktivnosti na edukaciji i poticanju korisnika na što bolje odvojeno prikupljanje otpada kroz medije i razne akcije: kontinuirano informiranje stanovnika i vikendaša putem letaka koji se dostavljaju uz račune za komunalne usluge; kontinuirana edukacija školske i vrtićke djece; nagradni natječaj za najbolji literarni rad na temu gospodarenja otpadom; akcija *Dođite po svoju vreću komposta* u sklopu koje je samo u 2014. godini podijeljeno više od 8.000 vreća komposta; suradnja s turističkim zajednicama putem oglašavanja u turističkim promidžbenim materijalima s naglaskom na odvojeno prikupljanje otpada u hotelima, kampovima i restoranima; akcija "plava vreća" za smanjenje onečišćenja plaža i obale; nabavka eko-bin posuda za opuške i sitne otpatke na plaži; tiskanje promotivnih letaka na osam stranih jezika o važnosti i načinu odvojenog prikupljanja otpada [11].

4.3. Rezultati projekta

Učinkovitost sustava gospodarenja otpadom ovisi o količini otpada koji je pravilno razvrstan i kao takav prikupljen. Prema podacima koje prati nadležno komunalno društvo, u početnoj 2006. godini odvojeno je nešto više od 18% otpada, a taj je postotak neprekidno rastao do 2014. godine kada se odvojeno prikupilo više od 40% otpada. Strategijom gospodarenja

otpadom Republike Hrvatske postavljen je cilj da se na državnoj razini do 2015. godine odvojeno prikuplja 23% otpada [4]. Taj cilj na otoku Krku ostvaren je već u drugoj godini provedbe projekta kada je odvojeno prikupljeno 24% otpada.

Od 2006. godine do kraja 2014. godine ukupno je odvojeno prikupljeno približno 54.000 tona korisnoga otpada. To je otoku i širem okruženju donijelo višestruke koristi - smanjen je pritisak na okoliš otpadom, postignuta je ušteda odlagališnoga prostora koji je mogao biti korišten do puštanja u rad županijskoga centra na Marišćini, a odvojeno prikupljeni otpad postao je vrijedna sirovina. Velike su i ekološko-sociološke prednosti, uz zapošljavanje 50 novih radnika, a Krk je postao ekološki poželjna destinacija što je posebno važno za turizam od kojega živi velik dio stanovnika [11].

5. Rasprava – usporedba s drugim otocima Primorsko goranske županije

Radi ocjene učinkovitosti sustava Eko otok Krk usporedili smo podatke iz Registra onečišćavanja okoliša koji vodi županijski Upravni odjel za prostorno uređenje, graditeljstvo i zaštitu okoliša, o količinama odvojeno sakupljenog otpada (miješanog komunalnog otpada, papira i kartona, metalnoga otpada, plastike, stakla, biorazgradivog i ostalog odvojeno sakupljenog otpada – istrošenih guma i vozila, elektroničkog otpada, glomaznog otpada, otpada od čišćenja ulica i tržnica, otpadnog drva i tekstila) u odnosu na količinu ukupno sakupljenog otpada na otocima Primorsko-goranske županije za razdoblje 2011.-2014. godine, što je prikazano u tablicama 2-5 [12]. Iz tih je podataka razvidno da je u navedenom četverogodišnjem razdoblju na Rabu odvojeno sakupljeno ukupno 3.617,15 tona otpada, na otocima cresko-lošinjskog arhipelaga 14.744,55 tona, a najviše na otoku Krku - 27.785,64 tona. Time je, uz činjenicu da je postotak odvojeno prikupljenog otpada na Krku iz godine u godinu rastao, u usporedbi s drugim otocima Primorsko-goranske županije dokazana najveća učinkovitost sustava gospodarenja otpadom Eko otok Krk.

Tablica 2. Količina odvojeno sakupljenog komunalnog otpada na otocima Primorsko-goranske županije 2011. [12]

Vrsta otpada (t)	Vodovod i čistoća Cres – M. Lošinj	Vrelo, Rab	Lopar Vratak, Lopar	Ponikve, Krk	Ukupno
Miješani komunalni otpad	15.618,00	9.406,00	2.514,00	11.537,00	39.075,00
Papir i karton	123,08	234,24	19,00	1.807,00	2.183,32
Metali	15,96	86,74		20,00	122,70
Plastika	114,16	90,44		540,00	744,60
Staklo	255,73	168,39		530,00	954,12
Biorazgradivi otpad	6.470,30			2.707,00	9.177,30
Ostalo	623,85	25,54			649,39
Ukupno sakupljeno	23.221,07	10.011,35	2.533,00	17.141,00	52.906,42
Ukupno odvojeno	7.603,07 (32,74%)	605,35 (6,00%)	19,00 (0,75%)	5.604,00 (32,69%)	13.831,42 (26,14%)

Tablica 3. Količina odvojeno sakupljenog komunalnog otpada na otocima Primorsko-goranske županije 2012. [12]

Vrsta otpada (t)	Vodovod i čistoća Cres – M. Lošinj	Vrelo, Rab	Lopar Vratak, Lopar	Ponikve, Krk	Ukupno
Miješani komunalni otpad	14.235,69	7.625,60	2.886,10	11.081,00	35.828,39
Papir i karton	170,90	224,15		1.971,00	2.366,05
Metali	24,93	13,31		24,00	62,24
Plastika	130,21	18,84		572,00	721,05
Staklo	257,61	39,64		605,00	902,25
Biorazgradivi otpad	1.635,00		92,05	3.396,00	5.123,05
Ostalo	224,67	17,33		619,00	861,00
Ukupno sakupljeno	16.679,01	7.938,87	2.978,15	18.268,00	45.864,03
Ukupno odvojeno	2.443,32 (14,64%)	313,27 (3,94%)	92,05 (3,09%)	7.187,00 (39,34%)	10.035,64 (21,88%)

Tablica 4. Količina odvojeno sakupljenog komunalnog otpada na otocima Primorsko-goranske županije 2013. [12]

Vrsta otpada (t)	Vodovod i čistoća Cres – M. Lošinj	Vrelo, Rab	Lopar Vrutak, Lopar	Ponikve, Krk	Ukupno
Miješani komunalni otpad	18.033,05	3.592,00	2.219,40	10.468,80	34.313,25
Papir i karton	204,28	329,37		2.285,58	2.819,23
Metali	20,68	59,01		25,76	105,45
Plastika	142,74	91,08		659,00	892,82
Staklo	324,82	150,66		634,34	1.109,82
Biorazgradivi otpad	1.251,72		112,00	3.539,50	4.903,22
Ostalo	9,62	28,80		13,46	51,88
Ukupno sakupljeno	19.986,91	4.250,92	2.331,40	17.626,44	44.195,67
Ukupno odvojeno	1.953,86 (9,77%)	658,92 (15,50%)	112,00 (4,80%)	7.157,64 (40,60%)	9.882,42 (22,36%)

Tablica 5. Količina odvojeno sakupljenog komunalnog otpada na otocima Primorsko-goranske županije 2014. [12]

Vrsta otpada (t)	Komunalne usluge Cres Lošinj, Cres	Dundovo, Rab	Lopar Vrutak, Lopar	Ponikve eko otok Krk, Krk	Ukupno
Miješani komunalni otpad	13.343,90	3.666,40	2.380,40	10.569,00	29.959,70
Papir i karton	336,68	386,04	54,60	2.223,00	3.000,32
Metali	193,30	49,29		37,00	279,59
Plastika	144,72	89,10		757,00	990,82
Staklo	326,18	300,58		674,00	1.300,76
Biorazgradivi otpad	1.698,42	786,80	149,20	4.146,00	6.780,42
Ostalo	45,00	0,95			45,95
Ukupno sakupljeno	16.088,20	5.279,16	2.482,20	18.406,00	42.255,56
Ukupno odvojeno	2.744,30 (17,00%)	1.612,76 (30,50%)	203,80 (8,20%)	7.837,00 (42,50%)	12.397,86 (29,33%)

6. Zaključak

Projekt Eko otok Krk primjer je dobre prakse lokalne samouprave u području gospodarenja otpadom do uspostave cjelovitoga županijskog sustava gospodarenja otpadom. U odnosu na prijašnje stanje vidljiv je napredak u načinu skupljanja i odlaganja otpada na odlagalištu Treskavac koje se sanira i priprema za zatvaranje te za izgradnju pretovarne stanice. U razdoblju 2006.-2015. ostvareni su iznimni rezultati u odvojenom prikupljanju i iskorištavanju vrijednih svojstava otpada, posebno biorazgradivog otpada, koji su i najbolji u usporedbi s drugim otočnim skupinama Primorsko-goranske županije. S više od 40% odvojeno prikupljenog otpada, Krk je premašio i na državnoj razini postavljeni cilj od 23% odvojeno prikupljenog otpada. S obzirom da je provedba ovoga projekta značajno pridonijela smanjenju pritiska na okoliš otpadom, ovaj primjer vrijedan je i za zaštitu okoliša otoka Krka i Primorsko-goranske županije u cjelini. Uspjeh projekta potvrđen je i posjetima mnogih subjekata iz cijele Hrvatske, no prije svega prihvaćanjem i provedbom od strane stalnih i povremenih stanovnika otoka Krka te njihovih gostiju.

Literatura

- [1] Strategija zaštite okoliša Primorsko-goranske županije (SN PGŽ 31/05)
- [2] Zakon o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/13)
- [3] Pravilnik o katalogu otpada (NN 90/15)
- [4] Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (NN 130/05)
- [5] Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007. do 2015. godine (NN 85/07, 126/10, 31/11, 46/15)
- [6] Izvješća o gospodarenju otpadom Primorsko-goranske županije 2008.-2011., Upravni odjel za prostorno uređenje, graditeljstvo i zaštitu okoliša Primorsko-goranske županije
- [7] Plan gospodarenja otpadom Primorsko-goranske županije (SN PGŽ 17/07)
- [8] Črnjar, M., Vahtar-Jurković, K., Postupanje s otpadom na otocima Primorsko-goranske županije, *1. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom na otocima*, Zadar, 2006.
- [9] Uršić, S., Brnardić, I., Ekološki zasnovan sustav zbrinjavanja komunalnog otpada otok Krk, Krk, 2003.
- [10] Ponikve 1960-2010, monografija, Makol marketing, Rijeka, 2010.
- [11] Ponikve Eko otok Krk, <http://www.ekootokkrk.hr/>
- [12] Registar onečišćavanja okoliša, Upravni odjel za prostorno uređenje, graditeljstvo i zaštitu okoliša Primorsko-goranske županije

UTJECAJ EKSPLOATACIJE TEHNIČKO- GRAĐEVNOG KAMENA NA OKOLIŠ NA PODRUČJU PRIMORSKO-GORANSKE ŽUPANIJE

ENVIRONMENTAL IMPACT OF EXPLOITATION OF THE CRUSHED STONE AGGREGATE IN THE COUNTY OF PRIMORJE AND GORSKI KOTAR

Koraljka Vahtar-Jurković*, Paulo Krmpotić**

Sažetak

Eksploatacija tehničko-građevnog kamena je zahvat koji značajno i nepovratno utječe na okoliš posebice na područjima kakva je Primorsko-goranska županija koja se odlikuje vrijednim prirodnim i kulturno-povijesnim naslijeđem te krajobraznom raznolikošću. Kako bi se utjecaji na okoliš takvih zahvata na vrijeme prepoznali te se utvrdile mjere zaštite okoliša, tijekom pripreme namjeravanog zahvata obavezno se provodi postupak procjene utjecaja na okoliš. S obzirom da se naša Županija sastoji od tri prostorne cjeline: priobalje, otoci i Gorski kotar, u radu se iznosi analiza utjecaja na okoliš i mjera zaštite okoliša na primjerima kamenoloma sa svakog od navedenih područja – Kolevrat (Novi Vinodolski), Garica (Vrbnik) i Mrkovac (Mrkopalj). Na temelju usporedbe rezultata procjene utjecaja na okoliš zaključuje se o opravdanosti odabranih lokacija i tehnologija eksploatacije u odnosu na posljedice po okoliš.

Ključne riječi: zaštita okoliša, procjena utjecaja na okoliš, eksploatacija tehničko-građevnog kamena, Kvarner, Gorski kotar

Abstract

Exploitation of the crushed stone aggregate [1] is a procedure that significant and irreversible impact on the environment, especially in the areas such is the County of Primorje and Gorski Kotar, which is characterized by a valuable natural and cultural-

* Primorsko-goranska županija, Upravni odjel za prostorno uređenje, graditeljstvo i zaštitu okoliša, Rijeka, Riva 10.

E-mail: koraljka.vahtar-jurkovic@pgz.hr

** DINOCOP d.o.o. Omišalj

E-mail: paulo.krmpotic@gmail.com

historical heritage and landscape diversity. In order to recognize the impacts and identify environmental protection measures, during the preparation of the intended project, the procedure of environmental impact assessment must be developed. Our region consists of three different areas: coast, islands and Gorski Kotar. Because of that the paper discusses the analysis of environmental impacts and environmental protection measures of the exploitation of crushed stone aggregate with examples of each of these areas - Kolevrat (Novi Vinodolski), Garica (Vrbnik) i Mrkovac (Mrkopalj). Based on the comparison of the results of environmental impact assessment it's concluded about justification of selected locations and technology of exploitation in relation to the environmental consequences.

Key words: *environmental protection, environmental impact assessment, exploitation of the crushed stone aggregate, Kvarner, Gorski Kotar*

1. Uvod

Rudarstvo, u koje pripada i eksploatacija tehničko-građevnog kamena, jedna je od najstarijih ljudskih djelatnosti koja je znatno utjecala na okoliš. Za dobivanje tehničko-građevnog kamena koristi se isključivo površinski način eksploatacije jer se tako može iskoristiti gotovo sva mineralna sirovina uz najmanji mogući trošak [2]. Zato je njezin utjecaj vidljiv u okolišu, a posebno je izražen na područjima kakva je Primorsko-goranska županija koja se odlikuje vrijednim prirodnim i kulturno-povijesnim naslijeđem te krajobraznom raznolikošću [3]. Na području Županije nalaze se sve tri vrste mineralnih sirovina – nemetalne, metalne i energetske, među kojima se po potencijalnosti ističu nemetalne sirovine. Najznačajnija nemetalna sirovina je tehničko-građevni kamen - ne samo zbog količina, nego i zbog činjenice da je eksploatacija kamenog agregata osnova razvoja građevinske industrije Županije [4]. Povijest iskopa građevnog kamena na ovom je području relativno duga, a intenzivira se u drugoj polovici 19. stoljeća i početkom 20. stoljeća kada se u kamenolomima Martinščica, Žurkovo, Kantrida i Preluk vadio kamen za velike projekte – primjerice, gradnju riječke luke. Ti su napušteni kamenolomi u međuvremenu postali vrlo vrijednim građevinskim zemljištem. Kasnije, a posebice u drugoj polovici prošloga stoljeća, zbog potreba gradnje višestruko su se povećale potrebe za kamenim agregatom pa su istražena i korištena nova eksploatacijska polja. Suvremena eksploatacija tehničko-građevnog kamena podliježe primjeni brojnih propisa među kojima su osim onih iz područja rudarstva, posebno značajni propisi iz područja prostornog uređenja te zaštite okoliša i zaštite prirode. Posebnu ulogu u smanjenju negativnih utjecaja na okoliš eksploatacije tehničko-građevnog kamena ima odabir lokacije i provedba postupka procjene utjecaja na okoliš [5].

2. Eksploatacija tehničko-građevnog kamena na području Primorsko-goranske županije

Eksploatacija tehničko-građevnog kamena dozvoljena je samo unutar eksploatacijskog polja određenog ugovorom o koncesiji i u granicama određenim rudarskim projektom [6]. Lokacija i obuvat polja određuje se lokacijskom dozvolom, kojom se određuje usklađenost zahvata s propisima i dokumentima prostornog uređenja.

Prostornim planom Primorsko-goranske županije nisu definirane lokacije eksploatacijskih polja niti su one ucrtane u kartografskim prikazima, ali su u kartografskom prikazu posebnih ograničenja u korištenju prostora prikazani prostori za istraživanje mineralnih sirovina, unutar kojih se prostornim planovima općina/gradova mogu odrediti eksploatacijska polja. U Odredbama za provođenje utvrđene su udaljenosti eksploatacijskih polja od građevinskih područja naselja, kao i onih namijenjenih ugostiteljsko-turističkoj te gospodarskoj namjeni. Utvrđeni su i isključni kriteriji pa se tako eksploatacijska polja ne mogu nalaziti na područjima vrijednih dijelova prirode – zaštićenih ili predloženih za zaštitu, na područjima vrijednog poljoprivrednog zemljišta i unutar infrastrukturnih koridora [3]. Eksploatacijska polja moraju biti udaljena od obale mora i voda 1.000 m [7].

Na području Primorsko-goranske županije evidentirano je 28 eksploatacijskih polja tehničko-građevnog kamena [4], a recentno se eksploatacija na temelju ugovora o koncesiji ili odobrenja za izvođenje rudarskih radova obavlja na ukupno devet lokacija, prikazanih u tablici 1 [8].

Tablica 1. Popis eksploatacijskih polja tehničko-građevnog kamena na kojima se eksploatacija obavlja temeljem ugovora o koncesiji ili odobrenja za izvođenje rudarskih radova [8]

R. br.	Eksploatacijsko polje	Grad/općina	Površina	Koncesionar	Trajanje eksploatacije
1.	Bojnak	Grad Cres	24,45	Toić Diego	2041.
2.	Fužinski Benkovac	Općina Fužine	25,94	Kamenolom Fužinski Benkovac	2044.
3.	Garica	Općina Vrbnik	23,44	GP Krk	2033.
4.	Grič – Hambarište	Grad Vrbovsko	4,00	Viadukt	odobrenje od 10.1.2007.
5.	Kikovica-Drenovi vrh	Općina Čavle	9,12	Mineral IGM	2023.

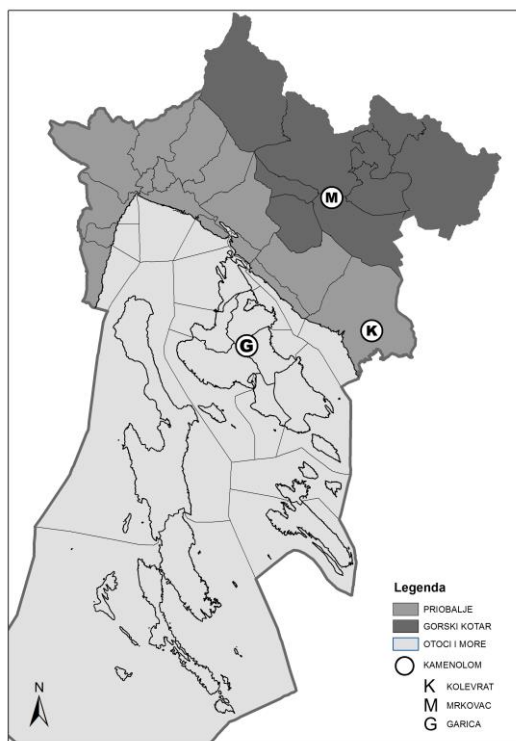
6.	Mrkovac	Općina Mrkopalj	10,20	MITEH	2049.
7.	Prezid	Grad Čabar	5,38	FINVEST	2017.
8.	Tresni breg	Općina Klana	18,55	GP Krk	2053.
9.	Kolevrat	Grad Novi Vinodolski	5,33	Kamenolom Kolevrat	2032.

3. Procjena utjecaja na okoliš eksploatacije tehničko-građevnog kamena

Eksploatacija tehničko-građevnog kamena ima višestruke utjecaje na okoliš koji se očituju u zauzimanju prostora, promjeni krajobraza, utjecajima na tlo (gubitak tla površinskom eksploatacijom, degradacija odlaganjem jalovine, moguće onečišćenje tla izlivanjem nafte, ulja, maziva i slično), štetnim utjecajima miniranja, onečišćenju zraka (plinovima oslobođenim pri miniranju, ispušnim plinovima mehanizacije i prašinom pri eksploataciji, utovaru, transportu i preradi), onečišćenju voda - površinskih (zamuljena otpadna voda od „mokrog“ postupka separacije i od ispiranja sitne prašine površinskim tečenjem, erozija) i podzemnih (moguće izlivanje štetnih tvari kroz propusnu podlogu u vodonosnik), opterećenju bukom, utjecaju na mikroklimu zbog promjene krajobraza i/ili uklanjanja većih šumskih površina, utjecaju na floru čistom sječom šuma i prašinom, utjecaju na faunu eksploatacijskim procesom, utjecaju na promet i prometnu infrastrukturu te u rizicima od ekoloških nesreća [9]. Zbog brojnosti utjecaja, od kojih su neki i nepovratni – kao što je utjecaj na izgled reljefa, odnosno krajobraz, za taj se zahvat obavezno provodi postupak procjene utjecaja na okoliš koji je u nadležnosti Ministarstva zaštite okoliša i prirode [10].

Procjena utjecaja zahvata na okoliš je jedan od najznačajnijih instrumenata zaštite okoliša. Ona je ujedno i instrument održivog razvitka jer uzima u obzir sva tri stupa održivog razvoja – gospodarska pitanja, društvena pitanja i zaštitu okoliša, s time da je naglasak na zaštiti okoliša i prirode, uključujući i ljudsko zdravlje. Na temelju studije utjecaja na okoliš kao stručne podloge, prepoznaju se utjecaji u pripremi namjeravanog zahvata, tijekom korištenja zahvata, nakon prestanka korištenja zahvata te u mogućim incidentnim situacijama. Ukoliko je to moguće, prepoznaje se i predlaže više različitih varijanti zahvata te odabire ona za koju se može pretpostaviti da će imati najmanji negativan utjecaj na okoliš. Postupak procjene utjecaja na okoliš provodi se u ranoj fazi planiranja zahvata, prije izdavanja lokacijske dozvole [5]. U sklopu postupka provodi se i postupak prethodne ocjene utjecaja zahvata na ekološku mrežu [5, 11, 12].

Od ukupno devedesetak postupaka procjene utjecaja na okoliš provedenih od osnivanja Županije 1993. godine do 2015. godine, provedeno je jedanaest postupaka procjene utjecaja na okoliš kamenoloma što je, uz procjene utjecaja na okoliš građevina za gospodarenje otpadom i cestovnih prometnica, najveći broj ukupno provedenih postupaka. Provedeni su postupci za kamenolome Voz na otoku Krku, Grič-Hambarište kod Vrbovskog, Ričičko bilo kod Novog Vinodolskog, Kikovica – Drenovi vrh, Brgučići – Klana, Bojnak na otoku Cresu, Podbadanj u zaleđu Crikvenice, Tresni breg – Klana, Garica na otoku Krku, Mrkovac kod Mrkoplja i Kolevrat na području Grada Novi Vinodolski [13, 14]. Šest postupaka provedeno je za područje priobalja, tri za kamenolome na otocima i dva za kamenolome na području Gorskog kotara. S obzirom na različitu konfiguraciju terena, vegetacijski pokrov i klimatske uvjete, utjecaj kamenoloma na području pojedine prostorne cjeline mogao bi biti različit pa se u nastavku istražuje analiza utjecaja na okoliš i mjera zaštite okoliša na odabranim primjerima po jednog kamenoloma sa svakog od navedenih područja: Kolevrat kod Novog Vinodolskog, Mrkovac kod Mrkoplja i Garica na otoku Krku .



Slika 1. Smještaj kamenoloma Kolevrat, Mrkovac i Garica [15]

3.1. Procjena utjecaja na okoliš kamenoloma Kolevrat kod Novog Vinodolskog [16]

Kao primjer procjene utjecaja na okoliš eksploatacije tehničko-građevnog kamena u priobalju odabran je postupak proveden 2014. godine za novo eksploatacijsko polje uz nekadašnji kamenolom Kolevrat na području Grada Novi Vinodolski. Nositelj zahvata je trgovačko društvo Kamenolom Kolevrat d.o.o. iz Viškova. Zahvat je u skladu s odredbama županijskoga prostornog plana i prostornog plana uređenja Grada Novog Vinodolskog.

Lokacija se nalazi 10 km zračne linije od Novog Vinodolskog, te se nalazi izvan građevinskih područja naselja i udaljena je od zaštićenih područja. Površina polja je oko 7 ha i s njega se predviđa dobivati 30.000 m³ tehničko-građevnog kamena godišnje.

Studijom utjecaja na okoliš razmatrane su tri varijante zahvata, između kojih je odabrana ona koja omogućuje racionalno iskorištavanje mineralne sirovine, ali i sanaciju starog kamenoloma.

Provedbom postupka prethodne ocjene utjecaja na ekološku mrežu utvrđeno je da nije potrebno provesti glavnu ocjenu jer zahvat neće imati značajan negativan utjecaj na ciljeve očuvanja i cjelovitost ekološke mreže. Studijom su analizirani mogući utjecaji zahvata tijekom njegove pripreme i eksploatacije na: staništa i vegetaciju, zaštićene divlje svojte, površinske i podzemne vode, tlo, kakvoću zraka, povećanje razine buke, gospodarske značajke, infrastrukturu, kulturno-povijesnu baštinu, sociološke značajke, krajobraz i geološku baštinu. Najveći su utjecaji zahvata na tlo, staništa i vegetaciju, dok su utjecaji na površinske i podzemne vode ocijenjeni prihvatljivim unatoč činjenici da se lokacija nalazi u IV. zoni sanitarne zaštite izvorišta Novljanska Žrnovnica jer u blizini nema stalnih ni povremenih vodotoka. Lokacija se nalazi na rubnom dijelu dvaju različitih krajobraznih područja – Gorskog kotara i Kvarnersko-velebitskog prostora pa se u krajobrazu izmjenjuju strukturni elementii znakoviti za prijelazne padine i brdski prostor. S obzirom da na istoj lokaciji već postoji stari kamenolom, kao i dalekovod, radi se o već promijenjenoj prirodnoj strukturi krajobraza pa novim površinama eksploatacije neće doći do značajnijeg negativnog utjecaja na krajobraz. Osim toga, radi se o lokaciji koja je zbog svoje udaljenosti i relativne izoliranosti slabije dostupna i manje vidljiva pa se negativni utjecaj na krajobraz može smatrati manje značajnim. Utjecaji na stanovništvo od promjene kakvoće zraka i povećanja razine buke mogu se smatrati zanemarivim jer u blizini nema naselja.

U odnosu na prepoznate utjecaje na okoliš utvrđene su mjere zaštite tijekom pripreme i eksploatacije zahvata te nakon prestanka eksploatacije, kao i mjere za sprječavanje ekološke nesreće.

Program praćenja stanja okoliša tijekom pripreme i eksploatacije obuhvaća praćenje kakvoće zraka, razine buke, kakvoće vode, stanje bioraznolikosti i georaznolikosti. Nakon prestanka eksploatacije predviđeno je da se otkopani prostor tehnički sanira, biološki rekultivira i, u granicama mogućeg, vrati prirodi.

3.2. Procjena utjecaja na okoliš kamenoloma Mrkovac na području Općine Mrkopalj [17]

Kao primjer procjene utjecaja na okoliš eksploatacije tehničko-građevnog kamena u Gorskom kotaru odabran je postupak proveden 2014. godine za proširenje postojećeg eksploatacijskog polja kamenoloma Mrkovac na području Općine Mrkopalj. Nositelj zahvata je trgovačko društvo MI-TEH – Mihelčić tehnika d.o.o. Zahvat je u skladu s odredbama županijskoga prostornog plana i prostornog plana uređenja Općine Mrkopalj.

Lokacija se nalazi 5 km južno od Delnica, oko 5 km istočno od Lokava te oko 5 km sjeverozapadno od Mrkoplja, izvan građevinskih područja naselja i relativno je udaljena od zaštićenih područja. Na širem području, na udaljenosti od oko 2 km je Sungerski lug, općinskim prostornim planom predviđen za zaštitu u kategoriji posebnog botaničkog rezervata te na sličnoj udaljenosti u smjeru jugozapada osobito vrijedni kultivirani krajobraz. Površina proširenog eksploatacijskog polja je oko 19,8 ha, od čega je površina novog dijela 10,2 ha, a eksploatacijom je predviđeno dobivati 210.000 m³ tehničko-građevnog kamena godišnje. Specifičnost lokacije zahvata je činjenica da je dio postojećeg eksploatacijskog polja unutar istočnog koridora planirane trase državne ceste čijom će izgradnjom polje biti podijeljeno na dva dijela i povezano deniveliranom internom cestom koja će premostiti državnu cestu.

Studijom utjecaja na okoliš razmatrana je samo jedna varijanta zahvata jer je u fazi odabira lokacije razmotreno 12 potencijalnih lokacija napuštenih površinskih kopova.

Provedbom postupka prethodne ocjene utjecaja na ekološku mrežu utvrđeno je da nije potrebno provesti glavnu ocjenu jer zahvat neće imati značajan negativan utjecaj na ciljeve očuvanja i cjelovitost ekološke mreže. Studijom su analizirani mogući utjecaji zahvata tijekom njegove pripreme i eksploatacije na: bioraznolikost, georaznolikost, vode, tlo, klimatske promjene, kakvoću zraka, krajobraz, povećanje razine buke, opterećenje otpadom, kulturnu baštinu, gospodarske značajke i stanovništvo. Najveći su utjecaji zahvata na tlo, staništa i vegetaciju. Navedeno je da se ne očekuju nepovoljni utjecaji na površinske i podzemne vode unatoč činjenici da se lokacija nalazi u IV. zoni sanitarne zaštite izvorišta Kupica i Zeleni vir. Lokacija se nalazi u krajobraznoj jedinici Gorski kotar, a glavne krajobrazne

vrijednosti čine planinski masivi i vrhovi do 1.500 m te uske doline gornjih tokova rijeka Kupe i Dobre. Prirodni krajobraz obilježavaju visoke mješovite šume te otvorene površine i proplanci. Značajke kulturnog krajobraza su površine koje su povezane sa stočarstvom, šumarstvom i poljoprivredom manjih razmjera, a na širem području su elementi koji već utječu na prirodni krajobraz: dalekovodi, autocesta, željeznička pruga, plinovod i naftovod. Vizualna izloženost lokacije je mala zbog položaja u kotlini i visoke vegetacije pa se negativni utjecaj na krajobraz može smatrati manje značajnim. Udaljenost kamenoloma od naseljenih područja je oko 3 km pa se ne očekuju značajni utjecaji na stanovništvo od promjene kakvoće zraka i povećanja razine buke.

U odnosu na prepoznate utjecaje na okoliš utvrđene su mjere zaštite tijekom pripreme i eksploatacije zahvata te nakon prestanka eksploatacije, kao i mjere za sprječavanje ekološke nesreće.

Program praćenja stanja okoliša tijekom pripreme i eksploatacije obuhvaća praćenje kakvoće zraka i kakvoće vode te izradu izvješća o tehničko-biološkoj sanaciji završno otkopanih prostora.

3.3. Procjena utjecaja na okoliš kamenoloma Garica na području Općine Vrbnik [18]

Kao primjer procjene utjecaja na okoliš eksploatacije tehničko-građevnog kamena na otocima odabran je postupak proveden 2011. godine za eksploatacijsko polje Garica na području Općine Vrbnik gdje se eksploatacija vrši još od 1971. godine. Nositelj zahvata je GP Krk d.d. iz Krka. Zahvat je u skladu s odredbama županijskoga prostornog plana i prostornog plana uređenja Općine Vrbnik. Lokacija zahvata nalazi se u sjeverozapadnom dijelu Općine Vrbnik. Udaljena je od Vrbnika oko 5 km, oko 6,5 km sjeveroistočno od grada Krka, 250 m zapadno od naselja Garica i 1,1 km južno od naselja Kras. Eksploatacijsko polje Garica ima površinu od 23,44 ha i sa njega je moguće dobivati 113.100 m³ tehničko-građevnog kamena godišnje. Studijom utjecaja na okoliš nisu razmatrane različite varijante zahvata.

Studijom su analizirani mogući utjecaji zahvata tijekom njegove pripreme i eksploatacije na: bioraznolikost, georaznolikost, vode, tlo, klimatske promjene, kakvoću zraka, krajobraz, povećanje razine buke, opterećenje otpadom, kulturnu baštinu, gospodarske značajke i stanovništvo. Najveći su utjecaji zahvata na tlo, staništa i vegetaciju. Ne očekuje se nepovoljni utjecaj na površinske ili podzemne vode. Lokacija zahvata nalazi se u krajobraznoj jedinici Kvarnersko-velebitskog prostora, a glavne krajobrazne vrijednosti ovoga područja čine kvarnerski otoci i planinski masivi od Učke do Velebita. Smještena je na središnjem dijelu otoka brdovitog reljefa s brojnim vrtačama gdje brežuljci rijetko prelaze

300 m visine. Karakteristike krajobraza su gusta vegetacija submediteranske šume hrasta, graba i jasena, u kombinaciji s makijom i pašnjacima s rijetkim krškim lokvama. Koridori dalekovoda uočljivi su samo kao pojedinačni akcenti vertikalnih elemenata, a koridori prometnica prate linije terena i stvaraju dojam prirodnosti. Postojeći iskop predstavlja akcent u prostoru uočljiv zbog svijetlih boja ogoljenih stijena u odnosu na okolnu vegetaciju, što je vidljivo iz udaljenog naselja Vrh. Utjecaji na kakvoću zraka i na povećanje razine buke zbog udaljenosti od naselja mogu se smatrati zanemarivim.

U odnosu na prepoznate utjecaje na okoliš utvrđene su mjere zaštite tijekom pripreme i eksploatacije zahvata te nakon prestanka eksploatacije, kao i mjere za sprječavanje ekološke nesreće uslijed izvanrednih događaja.

Program praćenja stanja okoliša tijekom pripreme i eksploatacije obuhvaća praćenje kakvoće zraka i razine buke dva puta godišnje te provedbu sanacije i biološke rekultivacije svakih pet godina.

3.4. Rasprava

U sva tri slučaja ne radi se o novim eksploatacijskim poljima, nego o proširenju postojećih, s time da su zahvati u skladu s dokumentima prostornog uređenja (DPU).

Za eksploatacijska polja Mrkovac i Garica nisu razmatrana varijantna rješenja, a kod eksploatacijskog polja Kolevrat razmatrana su tri varijantna rješenja koja se razlikuju po obuhvatu, trajanju i količini eksploatiranog kamena.

Lokacije svih kamenoloma udaljene su od naselja pa se ne očekuju negativni utjecaji na stanovništvo od promjene kakvoće zraka i povećanja razine buke. Planirani zahvati eksploatacije tehničko-građevnog kamena na sva tri polja nalaze se izvan zaštićenih područja prirode pa se, s obzirom na karakteristike zahvata i udaljenost zaštićenih područja, sa sigurnošću mogu isključiti negativni utjecaji zahvata na zaštićena područja. Jednako tako, isključen je utjecaj na ciljeve očuvanja i cjelovitost ekološke mreže. Najznačajnijim utjecajima na okoliš prepoznati su utjecaji na tlo, staništa i vegetaciju. Studijama utjecaja na okoliš nije naglašen utjecaj na okoliš od povećanog prometa. Mjere zaštite okoliša predviđene su na sva tri eksploatacijska polja tijekom pripreme zahvata i eksploatacije, kao i nakon prestanka eksploatacije. Svi nositelji zahvata u obvezi su praćenja stanja okoliša, a rezultati praćenja stanja okoliša trebaju se dostavljati jednom godišnje za proteklu kalendarsku godinu županijskom tijelu nadležnom za zaštitu okoliša. Za sve je kamenolome propisana tehnička sanacija i biološka rekultivacija.

Usporedba procjene utjecaja na okoliš triju kamenoloma prema odabranim elementima dana je u tablici 2.

Tablica 2. Usporedbe procjene utjecaja na okoliš za kamenolome Kolevrat, Garica i Mrkovac [14, 16, 17, 18]

<i>Elementi usporedbe</i>	<i>Kamenolom</i>		
	<i>Kolevrat</i>	<i>Garica</i>	<i>Mrkovac</i>
Novo eksploatacijsko polje	ne	ne	ne
Sukladnost s DPU	da	da	da
Razmatrana varijantna rješenja	da (3)	ne	ne
Blizina naselja	ne	ne	ne
Blizina zaštićenih područja	ne	ne	ne
Utjecaj na ekološku mrežu	ne	ne	ne
Najvažniji utjecaji na okoliš	tlo staništa vegetacija	tlo staništa vegetacija	tlo staništa vegetacija
Propisano praćenje stanja okoliša	da (zrak, buka, vode, bioraznolikost i georaznolikost)	da (zrak, buka)	da (zrak, vode)
Propisana sanacija nakon eksploatacije	da (tehnička sanacija i biološka rekultivacija)	da (tehnička sanacija i biološka rekultivacija)	da (tehnička sanacija i biološka rekultivacija)

Usporedba rezultata provedenih postupaka procjene utjecaja na okoliš pokazala je veliku sličnost, neovisno o lokacijama kamenoloma u različitim subregionalnim cjelinama Županije te potvrdila opravdanost mogućnosti eksploatacije tehničko-građevnog kamena i na većim otocima - izvan zaštićenog obalnog područja mora, kako je to sada predviđeno Zakonom o prostornom uređenju.

5. Zaključak

Eksploatacija tehničko-građevnog kamena značajno utječe na prostor i okoliš pa se lokacija eksploatacijskog polja treba pažljivo odabrati, uvažavajući osim raspoloživosti odgovarajućeg kamena i ograničenja utvrđena dokumentima prostornog uređenja. Osim toga, mora se obavezno provesti postupak procjene utjecaja na okoliš kojim se na temelju prepoznatih utjecaja na okoliš utvrđuju mjere zaštite i program praćenja stanja okoliša.

Usporedba utjecaja na okoliš kamenoloma Kolevrat, Garica i Mrkovac pokazala je da su oni slični u sva tri slučaja te potvrdila presudan utjecaj

pravilnog odabira lokacije u odnosu na udaljenost od naselja i zaštićenih područja. Odabranom tehnologijom predviđenom idejnim rudarskim projektom i mjerama zaštite umanjit će se ili u potpunosti isključiti štetni utjecaji na okoliš. U studijama utjecaja na okoliš sva tri kamenoloma naveden je podatak da je za svaki zahvat izrađena cost-benefit analiza koristi i troškova koje zahvat u okolišu donosi za užu i/ili širu zajednicu i koja - uključujući socijalne, demografske, gospodarske, ekološke, zdravstvene i druge utjecajne čimbenike, razmatra posljedice zahvata, odnosno poslovanja njegova nositelja na društvene koristi i štete koje će se pojaviti tijekom ostvarenja zahvata. Rezultati ovih analiza potvrdili su da su sva tri zahvata u tome smislu prihvatljiva.

Zaključno - navedeni primjeri potvrđuju da zaštita okoliša i zaštita prirode nisu zapreka razvoju. Rezultati provedenih postupaka procjene utjecaja na okoliš, kao preventivnog instrumenta zaštite okoliša, potvrđuju da je moguće ostvariti i gospodarski napredak, uz osiguranje provedbe mjera zaštite pojedinih sastavnica okoliša i očuvanja vrijednih dijelova prirode. Uspješnost provedbe ovih mjera i ublažavanje posljedica eksploatacije pratit će se u skladu s programom praćenja stanja okoliša.

Literatura

- [1] Benac, Č., Rječnik pojmova u primijenjenoj geologiji i geološkom inženjerstvu, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2013.
- [2] Ivković, S., Vrkljan, D., Površinska eksploatacija mineralnih sirovina, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2002.
- [3] Odluka o donošenju Prostornog plana Primorsko-goranske županije (SN 32/13)
- [4] Kruk, B. et al., Rudarsko-geološka studija potencijala i gospodarenja mineralnim sirovinama na području Primorsko-goranske županije, Hrvatski geološki institut, Zagreb, 2012.
- [5] Zakon o zaštiti okoliša (NN 80/13 i 78/15)
- [6] Zakon o rudarstvu (NN 56/13 i 14/14)
- [7] Zakon o prostornom uređenju (NN 153/13)
- [8] Dokumentacija Ureda državne uprave u Primorsko-goranskoj županiji, Službe za gospodarstvo, 2015.
- [9] Mesec, J., Utjecaji eksploatacije mineralnih sirovina na okoliš, 2012.
- [10] Uredba o procjeni utjecaja zahvata na okoliš (NN 61/14)
- [11] Zakon o zaštiti prirode (NN 80/13)
- [12] Pravilnik o ocjeni prihvatljivosti za ekološku mrežu (NN 146/14)
- [13] Vahtar-Jurković, K., 20 godina provedbe postupka procjene utjecaja na okoliš na području Primorsko-goranske županije, U: M. Brkic, ur., *Zbornik radova Prve*

regionalne konferencije o procjeni utjecaja na okoliš, 97-117. Hrvatska udruga stručnjaka zaštite prirode i okoliša, Zagreb, 2013.

- [14] Dokumentacija Upravnog odjela za prostorno uređenje, graditeljstvo i zaštitu okoliša Primorsko-goranske županije
- [15] GIS baza Javne ustanove Zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije
- [16] Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije tehničko-građevinskog kamena na budućem eksploatacijskom polju Kolevrat (Grad Novi Vinodolski). IRES - Institut za istraživanje i razvoj održivih ekosustava, Velika Gorica, 2013.
- [17] Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije tehničko-građevinskog kamena na budućem proširenom eksploatacijskom polju Mrkovac (Općina Mrkopalj). DVOKUT ECRO d.o.o., Zagreb, 2013.
- [18] Studija o utjecaju na okoliš eksploatacije tehničko-građevinskog kamena na eksploatacijskom polju Garica (Općina Vrbnik). SPP d.o.o., Varaždin, 2011.