

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI



Zbornik radova

XIV

Rijeka, 2011.

ZBORNİK RADOVA SVEUČILIŠTA U RIJECI
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM FLUMINENSIS



GRAĐEVINSKI FAKULTET
Sveučilišta u Rijeci

Izdavač:

Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, Vjekoslava Dukića b.b.

Za izdavača:

Aleksandra Deluka-Tibljaš, dekan

Glavni i odgovorni urednik:

Gordan Jelenić

Tehnička urednica:

Nana Palinić

Lektorica:

Saša Čohar Mančić

Urednički odbor:

Gojko Balabanić

Adriana Bjelanović

Saša Čohar Mančić

Nana Palinić

Vanja Travaš

Adresa uredništva:

Rijeka, Vjekoslava Dukića b.b.

Grafičko rješenje omota:

Alen Karlović, student

Grafička obrada, prijelom i tisak:

Digital IN d.o.o.

Naklada:

250 primjeraka

ISSN 0350-8552
ISBN 978-953-6953-29-5

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI

ZBORNİK RADOVA

KNJIGA XIV

Rijeka, prosinac 2011.

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

Sergije Babić

Viena Balen

Iva Baričević

Sandra Barić

Adriana Bjelanović

Igor Butorac

Diana Car-Pušić

Mehmed Čaušević

Karmela Čuljak

Katja Ćuk

Aleksandra Deluka-Tibljaš

Ivona Gudac

Vedran Jagodnik

Gordan Jelenić

Daniel Kovačević

Nino Krvavica

Nikola Lustig

Kristijan Ljutić

Ivan Marović

Leo Matešić

Bariša Matković

Lorella Mekić

Neven Milohanić

Milan Mišćević

Teo Mudrić

Nermina Mujaković

Nevenka Ožanić

Paulo Šćulac

Srđan Škunca

Sanja Šurdonja

Nataša Turina

RIJEČ DEKANA

U 2011. godini Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci nastavio je s radom na unapređenju svih svojih aktivnosti, uključujući i znanstveno publiciranje. Ono što je posebno obilježilo 2011. godinu je preseljenje Fakulteta u novu zgradu na Kampusu Sveučilišta u Rijeci na Trsatu. U novoj zgradi su nastavnicima, studentima i djelatnicima osigurani optimalni prostorni uvjeti za rad i razvoj. U slijedećem razdoblju resursi će se usmjeravati i na uspostavljanje istraživačke infrastrukture vezane za laboratorije kako bi se potakla i laboratorijska istraživanja kojih do sada, iz objektivnih razloga nepostojanja vlastitih laboratorijskih prostora, nije bilo dovoljno. Uz svesrdnu podršku Sveučilišta u tom su cilju pripremljeni i određeni projektni prijedlozi za aplikaciju na EU fondove.

Potrebno je naglasiti da je 2011. godine Fakultet ušao u suizdavaštvo časopisa Engineering Review zajedno sa Tehničkim fakultetom Sveučilišta u Rijeci, čime je aktivnost na izdavanju znanstvene i stručne periodike na Fakultetu dobila dodatan zamah. Mišljenja sam da ciljevi i svrha časopisa Engineering Review odlično nadopunjuju ciljeve Zbornika i da zajedno daju mogućnost nastavnicima i studentima Fakulteta da još većim opsegom svojih radova doprinesu znanstvenoj i stručnoj izdavačkoj djelatnosti Fakulteta.

I na kraju, željela bih, u ime Fakulteta i osobno, čestitati svim autorima radova, a posebno onima koji u Knjizi XIV Zbornika Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci ove godine objavljuju svoj prvi znanstveni ili stručni rad.

Veseli me što mogu reći da smo održali prošlogodišnje obećanje da ćemo Knjigu XIV promovirati u novoj zgradi i nadam se da će se na promociji okupiti svi autori te urednici i svi ostali zaslužni za uspješno izdavanje još jedne knjige Zbornika Građevinskog fakulteta u Rijeci.

dekanica
Aleksandra Deluka-Tibljaš

PREDGOVOR

U ovogodišnjoj, četrnaestoj po redu, knjizi Zbornika radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci predstavljeno je petnaest znanstvenih i stručnih radova nastavnika i studenata Fakulteta te ostalih znanstvenika i stručnjaka iz područja djelatnosti Fakulteta. Kao i u ostalim knjigama izašlim nakon ponovnoga pokretanja Zbornika 2008. godine i ovdje su u svojstvu glavnog autora najviše članaka izradili diplomanti sveučilišnih studija Fakulteta, koji vam zajedno sa svojim mentorima predstavljaju rezultate svojih diplomskih radova. Takvih članaka je osam, dok se u preostalim radovima kao glavni autori predstavljaju polaznici poslijediplomskih sveučilišnih studija s obradama raznih tema kojima su se u protekloj godini bavili na studiju. Ukupno, u ovome izdanju predstavljeno je petnaest radova iz područja hidrotehnike, geotehnike, nosivih konstrukcija, tehničke mehanike, organizacije i tehnologije građenja i prometnica.

Ove godine zamijećen je povećan interes autora za objavljivanjem radova u Zborniku i nije bilo moguće pozvati sve autore koji su taj interes iskazali da dostave svoje radove. Kao i u protekle dvije knjige i ove godine svi su dostavljeni radovi prošli kroz postupak detaljnog anonimnog istorazinskog recenziranja od strane najmanje dvoje znanstvenika ili stručnjaka iz područja rada, a i ove godine se cjelokupni tekst Zbornika nalazi na priloženom CD-u, gdje je dostupan u tehnici u kojoj je originalno napravljen, uključujući i slikovne priloge u boji. Ove godine je u uređivanje Zbornika bio uključen novoimenovani Urednički odbor, kojega sastavljaju predstavnici svih pet zavoda Fakulteta. Urednički odbor je aktivno sudjelovao u definiranju i održavanju profila Zbornika te imenovao dvije svoje članice da u svojstvu lektorice odnosno tehničke urednice sudjeluju u dodatnoj jezičnoj provjeri odnosno oblikovnoj doradi teksta. U završnoj korekturi teksta učestvovalo je i petnaest asistenata Fakulteta, koji su skrbno provjerili lektorirane članke i uklonili preostale tiskarske pogreške.

Zahvaljujem se svim autorima, recenzentima, članovima Uredničkoga odbora, posebno lektorici Saši Čohar Mančić i tehničkoj urednici Nani Palinić te korektorima na vremenu i trudu uloženom u ovaj Zbornik. Posebno me raduje što su ove godine uvedeni tehničko uređivanje te lektura i korektura radova kao nove značajke Zbornika, koje će se nastojati održati i u narednim izdanjima. I za kraj, veseli me sada već standardna predanost autora i recenzenata u pripremi i doradi radova te njihova posvećenost potrebi održavanja dostignute razine kvalitete Zbornika, što smatram zalogom njegove budućnosti.

U Rijeci, prosinca 2011.

Glavni i odgovorni urednik
Gordan Jelenić

SADRŽAJ

<i>Nino Krvavica, Nermina Mujaković:</i> Rješavanje problema gibanja vodnih valova uslijed poremećaja na površini.....	11
<i>Bariša Matković, Nevenka Ožanić:</i> Hidrološka analiza rijeke Mirne	31
<i>Milan Mišćević, Nevenka Ožanić:</i> Regulacija vodotoka Jelenska	53
<i>Vedran Jagodnik, Kristijan Ljutić:</i> Određivanje parametara čvrstoće pijeska u prijenosnom uređaju za izravni posmik.....	73
<i>Katja Ćuk, Leo Matešić:</i> Primjena EPS geopjene u geotehničkom inženjerstvu	89
<i>Neven Milohanić, Leo Matešić:</i> Preduvjeti primjene usporedivog iskustva u projektiranju geotehničkih konstrukcija	111
<i>Viena Balen, Paulo Šćulac, Mehmed Čaušević:</i> Armiranobetonske okvirne konstrukcije u potresnim područjima: usporedba proračuna za srednji i visoki razred duktilnosti na primjeru projekta javne garaže u Rijeci.....	131
<i>Daniel Kovačević, Adriana Bjelanović:</i> Analiza lučnog drvenog mosta posebne konstrukcije.....	149
<i>Nikola Lustig, Adriana Bjelanović, Igor Butorac:</i> Zamjena dotrajalih konstrukcija novim pješačkim drvenim mostovima veće trajnosti	169
<i>Teo Mudrić, Gordan Jelenić:</i> Trokutni konačni element za analizu srednje debelih ploča upotrebom vezane interpolacije.....	189

<i>Ivan Marović, Ivona Gudac, Nataša Turina, Diana Car-Pušić, Karmela Čuljak:</i> Usporedba primjene uobičajenih i specijaliziranih softvera u upravljanju građevinskim projektima	209
<i>Sandra Barić, Lorella Mekić, Sergije Babić:</i> Varijantna rješenja cestovnog čvorišta “Mlaka” u Rijeci	229
<i>Iva Baričević, Srđan Škunca, Aleksandra Deluka-Tibljaš:</i> Prometno rješenje područja Kampus-Klinički bolnički centar na Trsatu u Rijeci	251
<i>Kristijan Ljutić, Sergije Babić, Vedran Jagodnik:</i> Primjena GIS-a u izradi katastra zidova i propusta na županijskim cestama	273
<i>Sanja Šurdonja, Aleksandra Deluka-Tibljaš, Sergije Babić:</i> Utjecaj projektnih elemenata na prometnu usluznost kružnih raskrižja	295

RJEŠAVANJE PROBLEMA GIBANJA VODNIH VALOVA USLIJED POREMEĆAJA NA POVRŠINI

SOLVING THE PROBLEM OF WATER WAVE MOTIONS DUE TO DISTURBANCE ORIGINATING AT THE SURFACE

Nino Krvavica*, Nermina Mujaković**

Sažetak. Matematički opis gibanja realnih vodnih valova može predstavljati vrlo kompleksan zadatak, no većinu valnih pojava moguće je objasniti jednostavnijom teorijom valova malih amplituda, tj. linearnom teorijom valova. U ovom se radu rješava problem gibanja vodnih valova iznad ravnoga dna uslijed djelovanja impulsa sile na početno mirnu slobodnu površinu. Budući da je potrebno riješiti problem nestlačivog potencijalnog strujanja, polazi se od dvodimenzionalne Laplaceove diferencijalne jednadžbe te se definiraju odgovarajući rubni i početni uvjeti na slobodnoj površini i dnu. U nastavku rada daje se detaljni prikaz rješavanja dobivene diferencijalne jednadžbe primjenom Fourierove transformacije. Konačno je rješenje u obliku nepravog konvergentnog integrala, što je zahtijevalo primjenu aproksimativne metode stacionarne faze za izražavanje rješenja u jednostavnijemu i primjenjivijemu obliku.

Cljučne riječi: parcijalna diferencijalna jednadžba, valovi malih amplituda, Laplaceova jednadžba, Fourierova transformacija, metoda stacionarne faze

Abstract. Mathematical description of real water wave motions may represent a very demanding and complex problem, but most of the wave characteristics can be described by using the small amplitude wave theory, i.e. linear theory. This paper presents the analytical solution of water wave propagation over a horizontal bottom due to the application of an impulse over a segment of the

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: nino.krvavica@gradri.hr

** Odjel za matematiku Sveučilišta u Rijeci, Omladinska 14, Rijeka
E-mail: mujakovic@inet.hr

initially still water surface. The solution has been found by using Fourier transformation starting from the two-dimensional Laplace equation and defining the boundary and initial conditions on the free surface and on the bottom. The calculated result is an improper integral, so the method of stationary phase is applied to obtain a simpler form of the solution.

Key words: *partial differential equations, small amplitude wave theory, Laplace equation, Fourier transformation, method of stationary phase*

1. Uvod

Vodni valovi su proces periodičkog kolebanja neke granične plohe u vodi, udružen s osciliranjem vodnih čestica pod djelovanjem pobuđujućih i umirujućih sila. Razlikujemo površinske i unutarnje (dubinske) vodne valove. Kod površinskih valova pomiče se fizička vodna površina kao granica između dvaju medija (zraka i vode) bitno različite gustoće.

Za matematičko opisivanje gibanja vodnih valova koristi se model idealnog vala koji, za razliku od realnog vala, sadrži određena ograničenja. Pretpostavlja se da je val dvodimenzionalan, monokromatski i jednostavan, fluid je homogen, nestišljiv i neviskozan, površinska napetost i Coriolisov efekt se zanemaruju, a dno je horizontalno i nepomično. [1]

Radi pojednostavljenja problema koristi se teorija valova malih amplituda, odnosno linearna teorija, nazvana i Airyjeva teorija prema njezinom autoru, koju je opravdano koristiti za dubokovodne valove [1]. Matematički se linearna teorija može definirati kao prva aproksimacija kompletnog opisa ponašanja oscilatornih valova kojom se pretpostavlja da se, uz uvjet vrlo male amplitude vala, rubni uvjeti na površini mogu linearizirati.

Ovaj se rad bavi promatranjem dvodimenzionalnog gibanja vodnih valova opisanih linearnom teorijom koje nastaje uslijed impulsnog pritiska $I(x)$ na segment x slobodne površine u trenutku $t = 0$ kada je površina vode u početnom stanju mirovanja, uz konstantnu dubinu vode h . U literaturi je općeniti oblik ovoga problema poznat i pod nazivom Cauchy-Poissonov problem [2].

Matematička formulacija navedenoga problema predstavlja opis fizičkih procesa kretanja poremećaja u fluidu s ciljem pronalaska jedinstvenoga rješenja, a zadaje se u obliku homogene parcijalne diferencijalne jednačbe na određenoj domeni.

Budući da postoji beskonačan broj rješenja većine diferencijalnih jednačbi, bilo je potrebno zadati rubne uvjete kojima izdvajamo ono rješenje koje se

odnosi isključivo na zadani problem. Osim rubnih (prostornih) uvjeta, zadani su i početni (vremenski) uvjeti koji opisuju stanje pojedine pojave u određenom trenutku. Dobivena parcijalna diferencijalna jednadžba uz definirane rubne i početne uvjete rješava se primjenom Fourierove transformacije.

2. Postavka problema

Gibanje valova uslijed djelovanja impulsa na slobodnu površinu može se matematički opisati funkcijom potencijala brzine $\Phi(x, z; t)$ koja mora zadovoljiti određene rubne i početne uvjete koji se definiraju u nastavku.

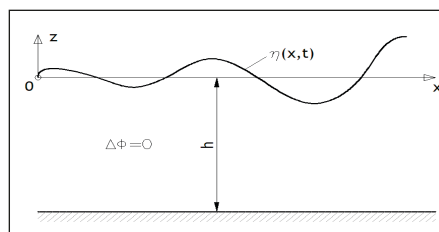
2.1. Potencijal brzine kao rješenje 2D homogene Laplaceove jednadžbe

Dvodimenzionalno bezvrtložno potencijalno gibanje fluida $\Phi(x, z; t)$ opisano je Laplaceovom jednadžbom

$$\Delta\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

definiranom na domeni $\Omega = \{(x, z, t), x \in R, -h \leq z \leq 0, t \geq 0\}$, gdje je x horizontalni smjer gibanja fluida, z vertikalni smjer gibanja fluida, h konstantna dubina vode, t vrijeme (Slika 1).

Izdizanje slobodne površine opisano je funkcijom $\eta(x, t)$ koja je definirana dinamičkim rubnim uvjetom i opisuje se u nastavku.



Slika 1. Grafički prikaz zadanog problema

2.2. Rubni uvjeti na slobodnoj površini

Dinamički rubni uvjet na površini, $z = 0$ za $t > 0$, koji proizlazi iz Bernoullijeve jednadžbe glasi

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t}(x, 0, t) + g\eta(x, t) = 0. \quad (2)$$

Kinematički rubni uvjet na površini, $z = 0$ za $t > 0$, glasi

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, 0, t) = \frac{\partial \eta}{\partial t}(x, t), \quad (3)$$

gdje je $\eta(x, t)$ nepoznata funkcija koja opisuje izdizanje slobodne površine, a g ubrzanje sile teže.

2.3. Rubni uvjeti na dnu

Kinematički rubni uvjet na dnu, $z = -h$ za $t \geq 0$, glasi

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, -h, t) = 0. \quad (4)$$

2.4. Početni uvjeti

Uslijed djelovanja impulsnog pritiska na dio slobodne površine u početnom trenutku $t = 0$ funkcija potencijala brzine je definirana na sljedeći način:

$$\Phi(x, 0, 0) = -\frac{1}{\rho} I(x), \quad (5)$$

gdje je ρ gustoća fluida, $I(x)$ funkcija definirana s

$$I(x) = \begin{cases} P, & |x| < a \\ 0, & |x| > a \end{cases}, \quad (6)$$

gdje je P impulsni pritisak po jedinici površine, $2a$ segment površine na koju djeluje impulsni pritisak P .

Površina je potpuno mirna u trenutku $t = 0$, pa vrijedi

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}(x, 0, 0) = 0 \quad (7)$$

što se dobiva iz (5) deriviranjem po t .

3. Fourierova transformacija

Navedena parcijalna diferencijalna jednačba rješava se metodom Fourierove transformacije [3, 4].

Pretpostavlja se da funkcija $\Phi(x, z; t)$ i njezine derivacije I i II reda po x , z i t teže nuli kada je $x \rightarrow \infty$, tako da je moguće odrediti Fourierove transformacije tih funkcija.

Definicija 1. Fourierova transformacija funkcije $\Phi(x, z; t)$ po varijabli x je funkcija

$$F(\Phi(x, z; t))(s) = \bar{\Phi}(s, z; t) = \varphi(s, z; t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x, z; t) \cdot e^{-isx} dx, s \in R \quad (8)$$

Definicija 2. Fourierova transformacija funkcije $\varphi(s, z; t)$ po varijabli s je funkcija

$$\begin{aligned} F^{-1}(\varphi(s, z; t))(x) &= F^{-1}(\bar{\Phi}(s, z; t))(x) = \\ &= \Phi(x, z; t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{isx} \cdot \varphi(s, z; t) ds, x \in R. \end{aligned} \quad (9)$$

U ovomu se radu također koriste sljedeća svojstva Fourierove transformacije:

Ako su funkcija $\Phi(x, z; t)$ i njezine k -te derivacije glatke ($k=1, 2, \dots, n-1$) te teže ka nuli kada $|x| \rightarrow \infty$ i ako su funkcija $\Phi(x, z; t)$ i sve njezine derivacije reda do n integrabilne, tada vrijedi:

$$F\left(\frac{\partial^n \Phi}{\partial x^n}(x, z; t)\right) = (i \cdot s)^n \varphi(s, z; t), n=1, 2, \dots, \quad (10)$$

$$F\left(\frac{\partial^n \Phi}{\partial z^n}(x, z; t)\right) = \frac{\partial^n \varphi}{\partial z^n}(s, z; t), n=1, 2, \dots, \quad (11)$$

$$F\left(\frac{\partial^n \Phi}{\partial t^n}(x, z; t)\right) = \frac{\partial^n \varphi}{\partial t^n}(s, z; t), n=1, 2, \dots. \quad (12)$$

4. Rješenje parcijalne diferencijalne jednadžbe

Promatrajući navedenu jednadžbu i rubne uvjete vidimo da se javljaju dvije nepoznate funkcije $\Phi(x, z; t)$ i $\eta(x; t)$, pa je sljedeći korak pojednostavljanjem rubnih uvjeta (2) i (3) eliminirati funkciju η čime se problem svodi na problem s jednom nepoznatom funkcijom $\Phi(x, z; t)$.

Deriviranjem (2) po vremenu t dobije se

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}(x, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}(x, 0, t). \quad (13)$$

Uvrštavanjem (13) u (3) dobije se

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, 0, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}(x, 0, t). \quad (14)$$

Sada umjesto dva rubna uvjeta (2) i (3) postoji jedan rubni uvjet (14) definiran na površini $z = 0$ za $t > 0$.

Rješenje $\Phi(x, z; t)$ problema odredit će se tako da se primijeni Fourierova transformacija po varijabli x koristeći izraze od (8) do (12) koji se primjenjuju na sve navedene jednadžbe. Koristeći se definicijama 1 i 2 te svojstvima (10) do (12) dobiva se jednostavniji problem za transformaciju $\bar{\Phi}(s, z; t) = \varphi(s, z; t)$. Jednakost (1) Fourierovom transformacijom postaje

$$-s^2 \varphi(s, z, t) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}(s, z, t) = 0 \quad (15)$$

na domeni $\Omega' = \{(s, z, t), s \in R, -h \leq z \leq 0, t \geq 0\}$.

Pomoću Fourierove transformacije jednakost (14) prelazi u

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z}(s, 0, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}(s, 0, t), s \in R, t > 0. \quad (16)$$

Rubni uvjet (4) postaje rubni uvjet za funkciju $\varphi(s, z; t)$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z}(s, -h, t) = 0. \quad (17)$$

Početni uvjet (5) postaje

$$\varphi(s, 0, 0) = -\frac{1}{\rho} \bar{I}(s), \quad (18)$$

gdje je $\bar{I}(s) = F(I(x))(s)$.

Svojstvo (7) postaje

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(s, 0, 0) = 0. \quad (19)$$

Nadalje, rješava problem (15) do (19) koji je očigledno jednostavniji od polaznog. Jednadžba (15) je obična diferencijalna jednadžba drugoga reda po varijabli z .

Pretpostavimo da je traženo rješenje $\varphi(s, z; t)$ moguće zapisati u obliku

$$\varphi(s, z, t) = a(s, t) \cdot v(z), \quad (20)$$

gdje su $a(s, t)$ i $v(z)$ nepoznate funkcije koje treba odrediti. Uvrštavanjem (20) u (15) dobiva se

$$-s^2 \cdot a(s, t) \cdot v(z) + a(s, t) \cdot \frac{\partial^2 v(z)}{\partial z^2} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 v(z)}{\partial z^2} - s^2 \cdot v(z) = 0. \quad (21)$$

Jednadžba (21) je obična diferencijalna homogena jednadžba s konstantnim koeficijentima za funkciju $v(z)$ koja se rješava supstitucijom $v(z) = e^{rz}$. Uvrštavanjem $v(z) = e^{rz}$ u (21) dobiva se karakteristična jednadžba $r^2 - s^2 = 0$, čija su rješenja $r_{1,2} = \pm |s|$.

Dakle, opće rješenje od (21) je oblika

$$v(z) = C_1 \cdot e^{|s|z} + C_2 \cdot e^{-|s|z}, \quad (22)$$

gdje su C_1 i C_2 nepoznati koeficijenti.

Uvrštavanjem (22) u (20) dobiva se

$$\varphi(s, z, t) = a(s, t) \cdot (C_1 \cdot e^{|s|z} + C_2 \cdot e^{-|s|z}),$$

$$\varphi(s, z, t) = A(s, t) \cdot e^{|s|z} + B(s, t) \cdot e^{-|s|z}, \quad (23)$$

gdje su $A(s, t)$ i $B(s, t)$ nepoznate funkcije koje treba odrediti.

Kao prvo, treba odrediti rješenje (23) koje zadovoljava i rubni uvjet (17). Deriviranjem (23) po varijabli z i stavljajući $z = -h$, rubni uvjet (17) postaje

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z}(s, -h, t) = A(s, t) \cdot |s| \cdot e^{-h|s|} - B(s, t) \cdot |s| \cdot e^{h|s|} = 0,$$

iz čega slijedi

$$B(s; t) = A(s; t) e^{-2h|s|}. \quad (24)$$

Nakon uvrštavanja (24) u (23) dobiva se

$$\varphi(s, z; t) = A(s; t) \cdot \left[e^{|s|z} + e^{-(2h+z)|s|} \right]. \quad (26)$$

Kao drugo, traži se rješenje koje zadovoljava drugi rubni uvjet (16). Deriviranjem (26) po varijabli z i dva puta po varijabli t dobiva se

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z}(s, z; t) = A(s; t) \cdot \left[|s| \cdot e^{z|s|} - |s| e^{-(2h+z)|s|} \right], \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}(s, z; t) = \frac{\partial^2 A(s; t)}{\partial t^2} \cdot \left[e^{z|s|} + e^{-(2h+z)|s|} \right]. \quad (28)$$

Uvrštavanjem (27) i (28) u (16) i sređivanjem dobiva se diferencijalna jednačba II reda po funkciji $A(s, t)$

$$\frac{\partial^2 A(s; t)}{\partial t^2} + g \cdot |s| \cdot \frac{1 - e^{-2h|s|}}{1 + e^{-2h|s|}} \cdot A(s; t) = 0. \quad (29)$$

Zbog jednostavnosti se uzima da je $\lambda = \lambda(s) = \frac{1 - e^{-2h|s|}}{1 + e^{-2h|s|}}$, gdje je vidljivo da je $\lambda > 0$. Jednačba (29) postaje

$$\frac{\partial^2 A(s; t)}{\partial t^2} + g \cdot |s| \cdot \lambda \cdot A(s; t) = 0.$$

Rješenje te jednačbe opet se traži separacijom varijabli, tj. Pretpostavlja se da je $A(s; t) = a(s) \cdot b(t)$, $a(s) \neq 0$. Tada se dobiva jednačba samo po nepoznatoj funkciji $b=b(t)$ oblika

$$\frac{\partial^2 b(t)}{\partial t^2} + g \cdot |s| \cdot \lambda \cdot b(t) = 0. \quad (30)$$

Kako je $g \cdot |s| \cdot \lambda > 0$ onda opće rješenje od (30) postaje

$$b(t) = C_1 \sin(t\sqrt{\lambda g |s|}) + C_2 \cos(t\sqrt{\lambda g |s|}), \quad (31)$$

gdje su C_1 i C_2 nepoznati koeficijenti.

Sada rješenje od (29) glasi

$$A(s; t) = a(s) \cdot \left[C_1 \sin(t\sqrt{\lambda g |s|}) + C_2 \cos(t\sqrt{\lambda g |s|}) \right]. \quad (32)$$

(32) se uvrsti u (26) i dobiva

$$\varphi(s, z; t) = a(s) \cdot \left[\begin{array}{c} C_1 \sin(t\sqrt{\lambda g |s|}) + \\ C_2 \cos(t\sqrt{\lambda g |s|}) \end{array} \right] \cdot \left[e^{z|s|} + e^{-(2h+z)|s|} \right]. \quad (33)$$

Koristeći početni uvjet (19) (33) se derivira po varijabli t te stavi $z=0$ i $t=0$. Uvjet (19) postaje

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(s, 0; 0) = a(s) \cdot \left[\sqrt{\lambda g |s|} C_1 \right] \cdot \left[1 + e^{-2h|s|} \right] = 0. \quad (34)$$

U (34) C_1 je jedini faktor koji može biti jednak nuli, dakle $C_1 = 0$. To znači da je

$$\varphi(s, z; t) = C(s) \cdot \cos(t \sqrt{\lambda g |s|}) \cdot \left[e^{z|s|} + e^{-(2h+z)|s|} \right], \quad (35)$$

gdje je $C(s)$ nepoznata funkcija.

Koristeći ovdje i početni uvjet (18) on sada daje jednakost

$$\varphi(s, 0; 0) = C(s) \cdot \cos(0) \cdot \left[e^0 + e^{-(2h+0)|s|} \right] = -\frac{1}{\rho} \bar{I}(s)$$

i dobiva se da je

$$C(s) = -\frac{\bar{I}(s)}{\rho \cdot (1 + e^{-2h|s|})}. \quad (36)$$

Iz (36) se dolazi do rješenja problema (15) do (19) u obliku

$$\varphi(s, z; t) = -\frac{1}{\rho} \bar{I}(s) \cdot \cos(t \sqrt{\lambda g |s|}) \cdot \frac{e^{z|s|} + e^{-(2h+z)|s|}}{1 + e^{-2h|s|}}. \quad (37)$$

Budući da (37) opisuje jednadžbu gibanja valova malih amplituda koji su u fizikalnom smislu dubokovodni valovi, dubina dna ne utječe na ponašanje funkcije potencijala brzine. Ukoliko se pretpostavi beskonačno duboko dno, tj. pušta da je $h \rightarrow \infty$, dobiva se

$$\varphi(s, z; t) = \lim_{h \rightarrow \infty} \left(-\frac{1}{\rho} \bar{I}(s) \cdot \cos(t \sqrt{\lambda g |s|}) \cdot \frac{e^{z|s|} + e^{-(2h+z)|s|}}{1 + e^{-2h|s|}} \right),$$

$$\varphi(s, z; t) = -\frac{1}{\rho} \bar{I}(s) \cdot \cos(t \sqrt{\lambda g |s|}) \cdot e^{z|s|}. \quad (38)$$

U tom slučaju, može se zaključiti da također vrijedi i

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \lambda = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{1 - e^{-2h|s|}}{1 + e^{-2h|s|}} = \frac{1 - e^{-\infty}}{1 + e^{-\infty}} = 1. \quad (39)$$

Pomoću (39) funkcija potencijala brzine (38) postaje

$$\varphi(s, z; t) = -\frac{1}{\rho} \bar{I}(s) \cdot \cos(t\sqrt{g|s|}) \cdot e^{z|s|}. \quad (40)$$

Nakon što se odredio analitički oblik transformirane funkcije $\varphi(s, z; t)$ treba napraviti njezinu inverznu Fourierovu transformaciju pomoću (9) te dobiti

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{1}{\rho\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{I}(s) \cos(t\sqrt{g|s|}) \cdot e^{z|s|} \cdot e^{isx} ds, \quad (41)$$

gdje je $\bar{I}(s)$ Fourierova transformacija funkcije $I(x)$ definirane sa (6).

$$\begin{aligned} \bar{I}(s) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \cdot e^{-isx} dx = \\ &= \frac{P}{\sqrt{2\pi}} \int_{-a}^a e^{-isx} dx = \frac{P}{\sqrt{2\pi}} \int_{-a}^a [\cos(sx) - i \sin(sx)] dx, \\ \bar{I}(s) &= \frac{2P}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sin(s \cdot a)}{s}. \end{aligned} \quad (42)$$

Nakon što smo uvrstili (42) u (41), traženo rješenje postaje

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{2P \cdot a}{\rho 2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(s \cdot a)}{s \cdot a} \cos(t\sqrt{g|s|}) \cdot e^{z|s|} \cdot e^{isx} ds. \quad (43)$$

Iz (43) se izdvaja ono rješenje koje se odnosi na slučaj kada se djelovanje jediničnoga impulsa sile svodi na točku $x = 0$. Pretpostavimo da površina na koju djeluje impuls sile teži nuli, $a \rightarrow 0$, dok impuls pritiska ujedno teži u beskonačnost, $P \rightarrow \infty$, na način da ukupni impuls sile teži konačnoj vrijednosti.

Za jedinični impuls sile vrijedi $2Pa = 1$. Koristeći poznatu formulu $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$, (43) pri $a \rightarrow 0$ postaje

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{1}{2\rho\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(t\sqrt{g|s|}) \cdot e^{z|s|} \cdot e^{isx} ds. \quad (44)$$

Koristeći Eulerovu jednadžbu $e^{isx} = \cos(sx) + i \sin(sx)$, (44) se može zapisati i na sljedeći način:

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{1}{2\rho\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\cos(t\sqrt{g|s|}) \cdot e^{z|s|} \cdot \cos(s \cdot x) + \cos(t\sqrt{g|s|}) \cdot e^{z|s|} \cdot i \sin(s \cdot x) \right] ds. \quad (45)$$

Sada treba razmotriti imaginarni integral iz (45). Budući da je podintegralna funkcija umnožak parne i neparne funkcije po varijabli s , vrijednost tog integrala je jednaka nuli. Tako (45) postaje

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{1}{2\rho\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(t\sqrt{g|s|}) \cdot e^{z|s|} \cdot \cos(s \cdot x) ds. \quad (46)$$

Podintegralna funkcija iz (46) je parna po varijabli s , pa se može prikazati i na sljedeći način

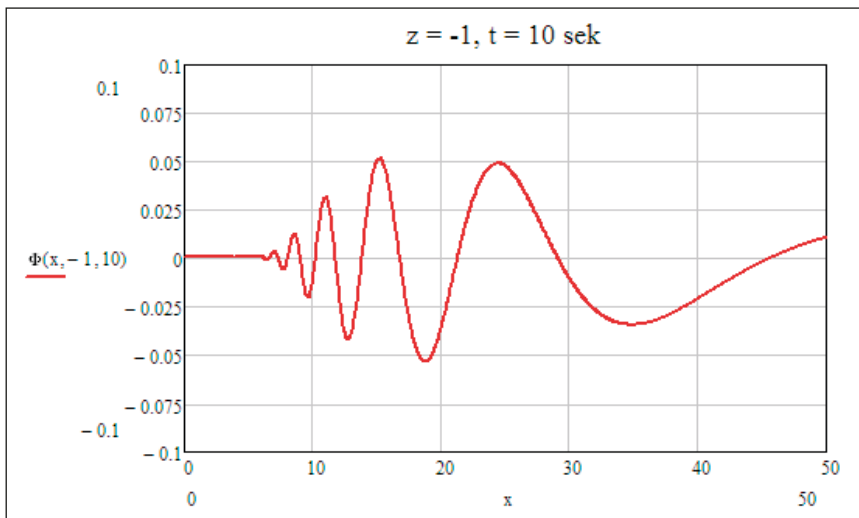
$$\Phi(x, z; t) = -\frac{1}{\rho\pi} \int_0^{\infty} \cos(t\sqrt{g \cdot |s|}) \cdot e^{z|s|} \cdot \cos(s \cdot x) ds. \quad (47)$$

Budući da je varijabla s iz skupa R^+ , može se staviti $|s| = s$ iz čega slijedi

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{1}{\rho \cdot \pi} \int_0^{\infty} \cos(s \cdot x) \cdot \cos(t\sqrt{g \cdot s}) \cdot e^{z \cdot s} ds. \quad (48)$$

Jednadžba (48) je rješenje Laplaceove parcijalne diferencijalne jednadžbe za zadane rubne i početne uvjete, a opisuje dvodimenzionalno gibanje valova koji nastaju uslijed djelovanja trenutnog jediničnog impulsa u polazišnoj točki na početno mirnoj površini.

Integral (48) konvergira za sve $z < 0$, pa ga je moguće jednostavno riješiti većinom numeričkih metoda. U nastavku je prikazano grafičko rješenje numeričke integracije (48) za $z = -1$ i $t = 10$ sek (Slika 2).



Slika 2. Grafički prikaz funkcije potencijala brzine $\Phi(x, z; t)$ za $z = -1$ u trenutku $t = 10$ sek.

Divergentnost (48) za $z = 0$ se može objasniti utjecajem člana e^{zs} , koji za $z < 0$ djeluje kao „prigušivač” podintegralne funkcije za sve velike vrijednosti varijable s , dok u slučaju $z = 0$ taj član „nestaje”, odnosno ima jediničnu vrijednost. Čak ni numerička integracija u tom slučaju ne daje konkretan rezultat.

Činjenica da se dobiveni rezultat u obliku (48) za $z = 0$ ne može riješiti niti jednom standardnom numeričkom metodom predstavlja problem, posebice u slučaju kada želimo odrediti funkciju oblika slobodne površine iz rubnog uvjeta

$$(2), \text{ koja je definirana upravo za } z = 0 \text{ i glasi } \eta(x, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t}(x, 0, t).$$

Iz (48) slijedi da funkcija η glasi

$$\eta(x; t) = -\frac{1}{\rho\pi\sqrt{g}} \lim_{z \rightarrow 0} \int_0^{\infty} \cos(s \cdot x) \cdot \sin(t\sqrt{g \cdot s}) \cdot \sqrt{s} \cdot e^{-zs} ds. \quad (49)$$

5. Metoda stacionarne faze

Metodu stacionarne faze razvili su Stokes i Kelvin u 19. stoljeću tijekom proučavanja gibanja gravitacijskih valova nastalih djelovanjem brodova [5]. Ovu aproksimativnu metodu uglavnom koristimo za rješavanje Fourierovih integrala općenitog oblika

$$I(x) = \int_a^b f(t) \cdot e^{ix\varphi(t)} dt, \quad (50)$$

gdje su a i b granice integriranja, $f(t)$, x i $\varphi(t)$ realne funkcije.

Izraz $e^{ix\varphi(t)}$ u (50) je kontinuirano oscilirajući, zbog čega se ne može iskoristiti svojstvo eksponencijalnoga opadanja ove funkcije kako se udaljava od maksimuma. Ali za velike vrijednosti x integrand u (50) naglo oscilira zbog čega se može očekivati aproksimativno poništavanje pozitivnih i negativnih doprinosa integralu od susjednih intervala, osim u blizini rubnih točaka a i b te u blizini točke gdje je $\varphi'(t) = 0$.

Osnovna ideja metode stacionarne faze je sljedeća [5]:

Ako je $\varphi'(c) = 0$ za neki $a \leq c \leq b$ (gdje je c stacionarna točka) i $\varphi'(t) \neq 0$ za sve $t \neq c$ na segmentu $[a, b]$, tada je okolina $t = c$ ona koja generira vodeći član u punom asimptotičkomu razvoju funkcije $I(x)$ kada $x \rightarrow \infty$. U tom slučaju (50) se može aproksimirati sljedećim izrazom

$$I(x) = f(c) \cdot e^{ix\varphi(c) + i \operatorname{sgn}(\varphi''(c)) \cdot \pi/4} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{x \cdot |\varphi''(c)|}}. \quad (51)$$

Stoker (1957) [6] je uspješno primijenio ovu metodu za rješavanje jednadžbe funkcije potencijalnoga gibanja valova malih amplituda uslijed djelovanja početnoga izdizanja slobodne površine. Ta formula ima vrlo sličan oblik kao i (48). U nastavku je prikazana primjena metode stacionarne faze na zadani problem kojom se (48) izražava u jednostavnijem obliku.

Kako bi se pronašla aproksimacija funkcije (48), funkcija se najprije mora preformulirati na sljedeći način:

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \pi} \left[\int_0^{\infty} \cos(s \cdot x + t \sqrt{g \cdot s}) e^{z \cdot s} ds + \int_0^{\infty} \cos(s \cdot x - t \sqrt{g \cdot s}) e^{z \cdot s} ds \right]$$

Uvodi se dvostruka supstitucija $\sigma = \sqrt{gs}$, $s = \frac{\sigma^2}{g}$, $ds = \frac{2\sigma}{g} d\sigma$ i $\omega = \frac{2x}{gt} \cdot \sigma$, $\sigma = \frac{gt}{2x} \cdot \omega$, $d\sigma = \frac{gt}{2x} \cdot d\omega$, iz čega slijedi da je $\frac{\sigma^2 x}{g} \pm t\sigma = k \cdot (\omega^2 \pm 2\omega)$, $k = \frac{gt^2}{4x}$,

pa vrijedi

$$\begin{aligned} \Phi(x, z; t) &= -\frac{gt^2}{4x^2 \cdot \rho \cdot \pi} \left[\int_0^{\infty} \cos(k(\omega^2 + 2\omega)) e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} \omega d\omega + \int_0^{\infty} \cos(k(\omega^2 - 2\omega)) e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} \omega d\omega \right] = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ -\frac{gt^2}{4x^2 \cdot \rho \cdot \pi} \left[\int_0^{\infty} \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} e^{i \cdot k(\omega^2 + 2\omega)} d\omega + \int_0^{\infty} \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} e^{i \cdot k(\omega^2 - 2\omega)} d\omega \right] \right\}, \end{aligned} \quad (52)$$

$$\Phi(x, z; t) = \operatorname{Re} \left\{ -\frac{gt^2}{4x^2 \cdot \rho \cdot \pi} [I_1 + I_2] \right\}, \quad (53)$$

gdje su

$$I_1(x, z; t) = \int_0^{\infty} \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} e^{i \cdot k(\omega^2 + 2\omega)} d\omega, \quad (54)$$

$$I_2(x, z; t) = \int_0^{\infty} \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} e^{i \cdot k(\omega^2 - 2\omega)} d\omega. \quad (55)$$

Zasebno se promatraju integralne funkcije (54) i (55) rješenja kojih se traže metodom stacionarne faze.

Za integral $I_1(x, z; t) = \int_0^{\infty} \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} e^{i \cdot k(\omega^2 + 2\omega)} d\omega$ uvodi se supstitucija

$$f(\omega) = \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}},$$

$$\varphi(\omega) = \omega^2 + 2\omega,$$

$$I_1(\omega) = \int_0^{\infty} f(\omega) \cdot e^{i \cdot k\varphi(\omega)} d\omega.$$

Traži se stacionarna točka funkcije φ , tj. rješava jednadžba $\varphi'(\omega) = 2\omega + 2 = 0$ te dobiva $\omega = -1$.

Za integral $I_2(x, z; t) = \int_0^{\infty} \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} e^{i \cdot k(\omega^2 - 2\omega)} d\omega$ se uvodi supstitucija

$$f(\omega) = \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}},$$

$$\varphi(\omega) = \omega^2 - 2\omega,$$

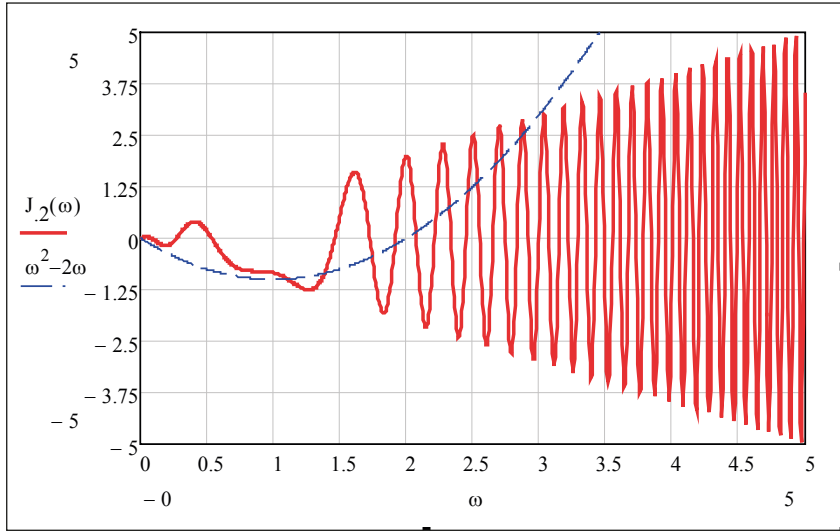
$$I_2(\omega) = \int_0^{\infty} f(\omega) \cdot e^{i \cdot k\varphi(\omega)} d\omega.$$

Traži se stacionarna točka funkcije φ , tj. rješava jednadžba $\varphi'(\omega) = 2\omega - 2 = 0$ i dobiva $\omega = 1$.

Postoje dvije stacionarne točke, po jedna za svaki integral, ali samo se $\omega = 1$ nalazi unutar intervala $[0, \infty)$ zbog čega se I_1 može zanemariti i dalje razmatrati

$$\text{samo } I_2(x, z; t) = \int_0^{\infty} \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} e^{i \cdot k(\omega^2 - 2\omega)} d\omega.$$

Na Slici 3 je prikazan realni dio podintegralne funkcije $J_2(\omega) = \omega \cdot e^{\frac{k\omega^2 z}{x}} e^{i \cdot k(\omega^2 - 2\omega)}$ gdje je $\omega = 1$ stacionarna točka funkcije $\varphi(\omega) = \omega^2 - 2\omega$. Također se može primijetiti kako je upravo područje oko stacionarne točke $\omega = 1$ ono koje će najviše pridonijeti vrijednosti integrala I_2 , dok će se ostale vrijednosti približno poništiti.



Slika 3. Grafički prikaz realnog dijela funkcije $J_2(\omega)$ za $z = 0$ i $k=10$

Traži se aproksimacija integrala (55) za stacionarnu točku $\omega = 1$:

$$f(1) = 1 \cdot e^{\frac{kz}{x}} = e^{\frac{kz}{x}},$$

$$\varphi(\omega) = \omega^2 - 2\omega, \quad \varphi(1) = -1,$$

$$\varphi'(\omega) = 2\omega - 2, \quad \varphi'(1) = 0,$$

$$\varphi''(\omega) = 2, \quad \varphi''(1) = 2.$$

Prema (51) slijedi da je aproksimacija integrala (55) oblika

$$I_2(x, z, t) = e^{\frac{kz}{x}} \cdot e^{-ik+i\pi/4} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{k \cdot 2}}. \quad (56)$$

Kako je ranije napomenuto, I_1 se zanemaruje. Nakon uvrštavanja (56) u (53) se dobiva

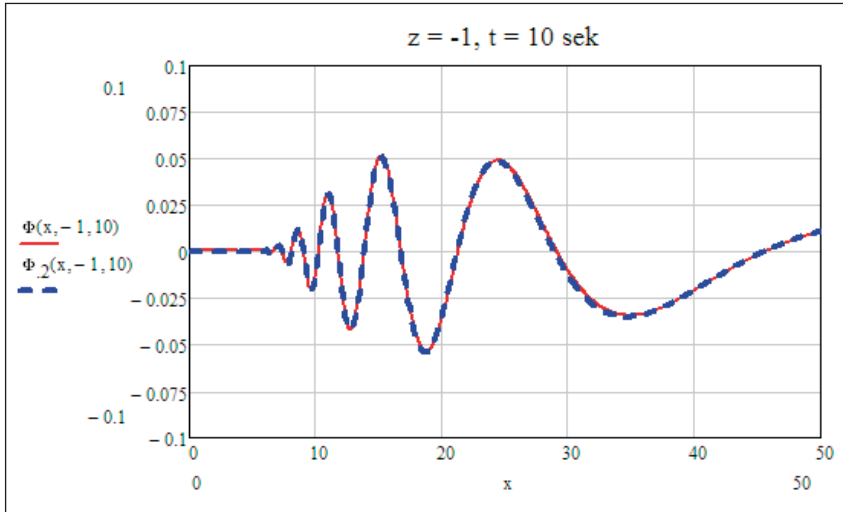
$$\Phi(x, z; t) = \operatorname{Re} \left\{ -\frac{gt^2}{4x^2 \cdot \rho \cdot \pi} e^{\frac{kz}{x}} \cdot e^{-ik+i\pi/4} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{k \cdot 2}} \right\},$$

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{gt^2}{4x^2 \cdot \rho \cdot \pi} \sqrt{\frac{\pi}{k}} \cdot e^{\frac{kz}{x}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - k\right)$$

Uvrštavanjem $k = \frac{gt^2}{4x}$ i sređivanjem izraza dobiva se

$$\Phi(x, z; t) = -\frac{\sqrt{gt}}{2x^{3/2} \rho \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{gt^2 z}{4x^2}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{gt^2}{4x}\right). \quad (57)$$

Usporedba analitičkog rješenja (48) i njegove aproksimacije (57) prikazana je grafički (Slika 4).



Slika 4. Grafički prikaz funkcije Φ koja odgovara (48) i funkcije Φ_2 koja predstavlja aproksimaciju (57) za $z = -1$ i $t = 10$ sek.

Kao što se može primijetiti sa Slike 4, funkcija potencijala Φ i njezina aproksimacija dobivena metodom stacionarne faze Φ_2 pokazuju vrlo dobro poklapanje.

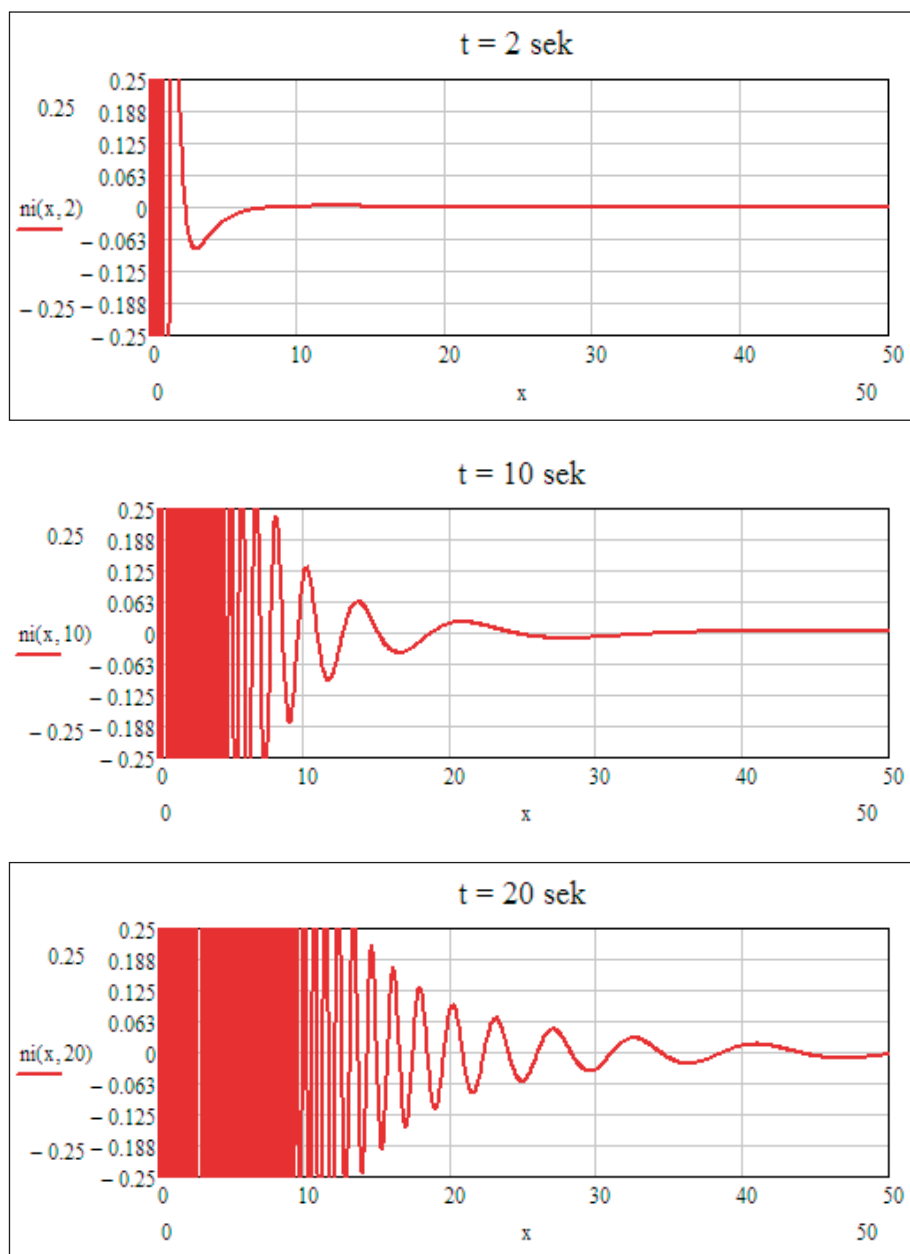
Još je preostao problem određivanja izraza za funkciju oblika površine $\eta(x; t)$. Uvrštavanjem (57) u rubni uvjet (2) dobiva se

$$\eta(x, t) = \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\sqrt{gt}}{2x^{3/2} \rho \sqrt{\pi}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{gt^2}{4x}\right) \right] \quad (58)$$

i nakon sređivanja, funkciju $\eta(x; t)$ se izražava u aproksimativnom obliku

$$\eta(x, t) = \frac{1}{x \rho \sqrt{g \pi x}} \cdot \left[\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{gt^2}{4x}\right) + \frac{gt^2}{4x} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{gt^2}{4x}\right) \right]. \quad (59)$$

Grafički prikaz (59) u trenutku $t = 2, 10$ i 20 sekundi prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Grafički prikaz funkcije slobodne površine $\eta(x; t)$ za $t = 2, 10$ i 20 sek

6. Zaključak

U ovom se radu prikazuje rješenje Cauchy-Poissonovog problema širenja linearnih valova pokrenutih djelovanjem jediničnoga impulsa na početno mirnu površinu.

Predočen je detaljni prikaz postupka rješavanja homogene parcijalne diferencijalne jednačbe uz zadane rubne i početne uvjete koristeći se metodom Fourierove transformacije. Budući da je dobiveno rješenje funkcija potencijala brzine određena u obliku integrala koji ne konvergira za vrijednosti na slobodnoj površini, primijenjena je metoda stacionarne faze kako bi se odredila aproksimativna funkcija slobodne površine u jednostavnom obliku. Također je razvidno da dobivena aproksimacija vrlo dobro odgovara originalnoj potencijalnoj funkciji brzine u integralnom obliku te je nakon toga određena i funkciju oblika slobodne površine koja je grafički prikazana za više vremenskih koraka.

Primjenu navedenoga rješenja na vrlo je zanimljiv način koristio i proveo Deacon sa suradnicima (1949, 1952) [7,8] kada je izveo korelaciju između pojava velikih oluja na Atlantskom oceanu i opažanja dugačkih morskih valova zabilježenih uz Englesku obalu neposredno nakon oluja. Analizirajući smjer kretanja i periode valova te poznavajući lokaciju i intenzitet oluja na oceanu, zaključio je kako je moguće na temelju opažanja valova uz obalu razviti metode predviđanja položaja i smjera kretanja oluja na udaljenim lokacijama gdje nema meteoroloških opažanja.

7. Literatura

- [1] R. G. Dean, R. A. Dalrymple. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists (Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 2)*. World Scientific Publishing, Singapore, 1991.
- [2] H. Lamb. *Hydrodynamics (Sixth Edition)*. Cambridge University Press, New York, 1975.
- [3] N. H. Asmar. *Partial Differential Equations with Fourier Series and Boundary Value Problem (Second Edition)*. University of Missouri, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2000.
- [4] R. Haberman. *Applied Partial Differential Equations with Fourier Series and Boundary Value Problems (Fourth Edition)*. Department of Mathematics, Southern Methodist University, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003.

-
- [5] S. J. A. Malham. *An Introduction to Asymptotic Analysis*. Department of Mathematics, Heriot-Watt University, *nepublicirano*
- [6] J. J. Stoker. *Water Waves. The Mathematical Theory with Applications*. Institute of Mathematical Sciences, New York University, New York, 1957.
- [7] G. E. R. Deacon. *Recent studies of waves and swell*. Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 51, New York, 1949.
- [8] G. E. R. Deacon. *Analysis of sea waves*. US National Bureau of Standards, Gravity Waves, NBS Circular 521, 1952.

HIDROLOŠKA ANALIZA RIJEKE MIRNE

HYDROLOGICAL ANALYSIS OF MIRNA RIVER

Bariša Matković*, Nevenka Ožanić**

Sažetak: U ovome radu izneseni su rezultati nove hidrološke analize rijeke Mirne koja predstavlja izvanredno vrijedni alogeni vodotok koji iz nekrškog teče u krško područje. U krškom je području Mirna usjekla kanjon. Pod imenom Mirna javlja se nakon spoja Rečine s Dragom, a utječe u Jadransko more kod Antenala blizu Novigrada. Rijeka Mirna je najznačajniji vodotok na Istarskom poluotoku sa slivnom površinom od oko 725 km² (utjecajni, tj. hidrogeološki sliv, od čega je približno 380 km² neposrednog površinskog sliva). Oko 7 % sliva (45 km²) nalazi se na području Slovenije. Duljina glavnog toka iznosi 38,5 km sa srednjim godišnjim protokom od 6,5 m³/s (izmjerena na vodomjernoj stanici Portonski most u razdoblju 1978.-2007.). Zbog geoloških i geomorfoloških karakteristika slivnog područja, Mirna ima razvijenu hidrografsku mrežu, ali prevladavaju uglavnom povremeni površinski vodotoci s naglašeno bujičnim karakterom. Najveća visina u slivu iznosi 694 m n.m., a najmanja na ušću, 2,57 m ispod razine mora. Rijeka Mirna se prihranjuje vodom sa slivnog područja i preljevnim vodama jakih krških izvorišta koja su zahvaćena za vodoopskrbu Sv. Ivan u Buzetu, Bulaž kod Istarskih Toplica te Gradole. Osim ovih izvora postoje i nekaptirani izvori Tombazin kod Buzeta, izvorište Mlini u slivu Bračane, izvori na području Donje Mirne itd. Izvorišta Bulaž i Mlini dijelom se prihranjuju i sa područja Slovenije.

Cijelo područje toka Mirne ima specifičnu ambijentalnu vrijednost zbog lokalnih posebnosti vezanih uz vodu i prostornih vrijednosti.

Cilj ovoga rada je hidrološka analiza rijeke Mirne kako bi se utvrdio ekološki prihvatljivi minimum (EPP). U članku su detaljno analizirani hidrološki nizovi mjereni na tri stanice na rijeci Mirni (stanice Buzet, Motovun i Portonski most). U proteklom razdoblju izrađeno je više radova koji su obrađivali hidrologiju rijeke Mirne, ali ni u jednom od radova nije se obradila problematika ekološki

* INSTITUT IGH d.d., Slavka Tomašića 5, Rijeka
E-mail: barisa.matkovic@igh.hr

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: nozanic@gradri.hr

prihvatljivog protoka (EPP) te će se iz tog razloga u sklopu ovoga rada proračunati ekološki prihvatljivi protok EPP na profilima Motovun i Portonski most.

Ključne riječi: *hidrologija krša, ekološki prihvatljivi protok, rijeka Mirna, Hrvatska*

Abstract: *This paper shows results of the new hydrological analysis for the Mirna River which represents an exceptionally valuable allogenic watercourse flowing from a non-karst into a karst area. In the karst area the river has cut in a canyon. The name Mirna has appeared after the confluence of the Rečina and the Draga and the river flows into the Adriatic Sea near Antenal by Novigrad. The Mirna River is the most significant watercourse on the Istrian Peninsula with the catchment area of approximately 725 km² (influential, i.e. hydro-geological catchment with approximately 380 km² of immediate surface catchment). Some 7% of the catchment (45 km²) is on the territory of Slovenia. The length of the main course is 38.5 km with the mean annual flow of 6.5 m³/s (measured on the Portonski most stream gauge in the period between 1978 and 2007). Due to geological and geomorphological characteristics of the catchment area, the Mirna has a developed hydrographic network, but temporary surface watercourses of a pronounced torrential nature are prevalent. The highest level in the catchment reaches 694 m AMSL, and the lowest 2.57 m BMSL at the river mouth. The Mirna River water is fed from the catchment area and by the spill-over water from the strong karst springs collected for the water supply of Sv. Ivan in Buzet, Bulaž near Istarske Toplice and Gradole. In addition to these springs, there are the uncollected ones, i.e. the Tombazin near Buzet, the Mlini spring inside the Bračana catchment, springs within the Donja Mirna area and so on. Bulaž and Mlini springs are also partially fed from the territory of Slovenia. The entire Mirna watercourse area possesses a specific ambiental value due to local uniqueness related to water and spatial values.*

The purpose of this paper is the hydrologic analysis of the Mirna river in order to establish the ecologically acceptable minimum (EPP). This paper analyses in detail hydrological series measured on three gauging stations on the Mirna river (Buzet, Motovun and Portonski most stations). In the past there were several papers dealing with the Mirna river hydrology, but none of them dealt with the problems of the ecologically acceptable flow (EPP). Therefore, the ecologically acceptable flow (EPP) on Motovun and Portonski most profiles will be calculated in this paper.

Key words: *karst hydrology, ecologically acceptable flow, the Mirna River, Croatia*

1. Uvod

Krš je moguće definirati kao skup reljefnih oblika koji su produkt kemijskog trošenja (korozije) stijena topivih u vodi. Uglavnom su to karbonatne stijene (vapnenci i rjeđe dolomiti). Zbog kalcijeveg karbonata koji je topiv u vodi,

karbonatne stijene su topive u vodi pa je stoga propuštaju. Ta se topivost ne ostvaruje trenutno, nego kroz dugi niz godina, a propusnost je također znatna zbog toga jer kemijskim nagrizanjem nastaju pukotine zbog kojih stijena više ne može zadržavati vodu.

Krški vodonosnici su vrlo složeni sustavi koje je jako teško definirati. Velika heterogenost krških vodonosnika često otežava, pa čak i onemogućava određivanje smjerova i brzina tečenja podzemne vode u prostoru krša. Svojstva hidrauličke provodljivosti u krškome podzemlju izrazito su anizotropna. Izazov pri istraživanju krških vodonosnika predstavlja činjenica da u kršu istovremeno postoji brzo turbulentno tečenje kroz veće krške provodnike i sporo (difuzno) laminarno tečenje kroz sitne pukotine krške matrice [1]. Brojni, slučajni i stoga nepredvidivi i neočekivani površinski i podzemni krški oblici utječu na to da se veze između površinskih i podzemnih voda mijenjaju tijekom vremena, nerijetko vrlo naglo. Promjene podzemnih krških veza kao i veza između podzemnih i površinskih voda uzrokovane su: 1) različitim prihranjivanjem iz raznih dijelova sliva, glavniinom uslijed promjenjive raspodjele oborina u prostoru i vremenu; 2) različitim razinama podzemnih voda u dijelovima krških vodonosnika i njihovim brzim promjenama uvjetovanim geološkom strukturom vodonosnika; 3) antropogenim utjecajima (izgradnjom brana i akumulacija, velikim iskopima, masovnim crpljenima podzemne vode itd.) itd.

Krš posebno karakterizira međusobno snažno uvjetovana interakcija površinskih i podzemnih voda [2, 3, 4]. Podzemna i površinska voda hidraulički su povezane kroz velik broj krških oblika koji omogućavaju izmjenu podzemne i površinske vode [5]. Brze i velike oscilacije razina podzemnih voda u kršu utječu izravno na hidrološki i hidrogeološki režim otvorenih vodotoka, ali i onih koji teku podzemljem krša. Prilikom njihovog izučavanja treba imati na umu da su podzemne vode, kao i podzemni vodotoci, u kršu izrazito heterogeni po svojim morfološkim oblicima te, kao posljedica toga, i po hidrauličkim, hidrološkim i hidrogeološkim karakteristikama.

Rijeka Mirna je alogena krška rijeka koja iz nekrškog ide u krško područje. U krškome području je usjekla kanjon. Obzirom na krško područje na kojem se nalazi, određivanje sliva rijeke Mirne je vrlo teško. Hidrogeološki sliv rijeke Mirne iznosi oko 725 km², od čega je približno 380 km² neposrednog površinskog sliva. Obzirom na složenost sliva rijeke Mirne, izučavanje njenih hidroloških i hidrogeoloških karakteristika u prostoru i vremenu od golemog je značenja kako s praktičnog i lokalnog, tako i sa šireg teorijskog aspekta. Zbog nedostatka podataka o podzemnim vodama u slivu rijeke Mirne, u ovom će se radu analizirati isključivo njene hidrološke karakteristike.

2. Osnovni podaci o slivu i vodotoku

Sliv rijeke Mirne smješten je u centralnom i zapadnom dijelu istarskog poluotoka (Slika 1.) na području poznatom pod nazivom „siva Istra“, a izgrađen je od eocenskog fliša sive boje i kvartarnih nanosa, naslaga vrlo reducirane propusnosti. Stoga se na ovom području razvila mreža izraženih površinskih vodnih tokova koje karakterizira izrazita bujičnost.

Pod imenom Mirna javlja se nakon spoja Rečine s Dragom oko 2,3 km uzvodno od Buzeta, a utječe u Jadransko more kod Antenala u blizini Novigrada. Duljina glavnog toka iznosi 38,5 km sa srednjim godišnjim protokom od 6,5 m³/s (izmjerena na vodomjernoj stanici Portonski most u razdoblju 1978.-2007.). Najveća visina u slivu iznosi 694 m n.m., a najmanja na ušću, 2,57 m ispod razine mora.



Slika 1. Opći podaci o slivu s ucertanim položajem svih hidroloških i klimatoloških postaja čiji su podaci korišteni u ovom radu

Vodna bilanca Mirne čini 30% ukupne vodne bilance istarskog područja. Osim dreniranja oborinskih voda površinskim vodotocima, Istarski poluotok karakterizira i snažno dreniranje voda u krškom podzemlju, uslijed čega je na tom području nazočan veći broj izvora i lokaliteta s istjecanjem podzemnih voda. Veliki dio vodne bilance Mirne daju krški izvori Gradole, Bulaž i Sv.Ivan koji su locirani na rubovima dolina uz rijeku Mirnu. Izvori Bulaž i Mlini dijelom se prihranjuju i iz područja Slovenije. Bujica Bračana, jedna od značajnijih

pritoka, ima karakter prekograničnog vodotoka, što vrijedi i za nekoliko bujica (ponornica) na području Zrenjske visoravni.

Izvori Gradole, Bulaž i Sv.Ivan su kaptirani za vodoopskrbu i čine značajan vodoopskrbni kapacitet istarskog područja.

U slivu Mirne 1987. god izgrađena je akumulacija Butonega kapaciteta $19,7 \times 10^6$ m³. Osim zaštite od velikih voda dolinskog područja rijeke Mirne, akumulacija ima i vodoopskrbnu funkciju.

U sklopu ovoga rada analizirani su hidrološki podaci s tri hidrološke postaje na rijeci Mirni, i to Buzet (1978.-2002.), Motovun (1978.-2009.) i Portonski most (1978.-2009.). Klimatološki podaci (oborine i temperature) obrađeni su s tri klimatološke postaje koje su smještene u i oko sliva rijeke Mirne, i to postaje Abrami (1981.-2007.), Celega (1981.-2007.) i Poreč (1981.-2007.).

3. Analiza oborina i temperatura zraka

U Tablici 1 navedeni su nazivi, nadmorske visine, prosječne godišnje temperature i prosječne godišnje količine oborina izmjerene u razdoblju 1981.-2007. godine za tri klimatološke postaje u i oko sliva Mirne.

Tablica 1. Osnovne karakteristike tri stanice na kojima se mjere oborine prikazane na Slici 1 (H-nadmorska visina stanice; P-prosječna godišnja oborina u razdoblju (1981.-2007.); T-srednja godišnja temperatura zraka u razdoblju (1981.-2007.))

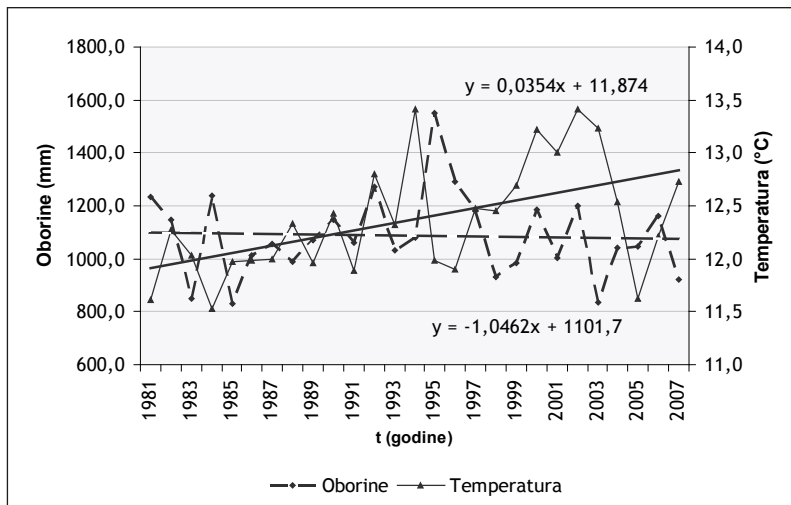
Stanica	H [m n.m.]	P [mm]	T [°C]
Abrami	130	1.091	12,40
Celega	21	839	13,60
Poreč	22	837	13,50

Položaji stanica ucrtani su na Slici 1. Iz navedenih podataka moguće je uočiti da se prosječna godišnja oborina na analizom obuhvaćenim postajama kreće između 837 (Poreč) i 1.091 (Abrami) mm. Najveća godišnja količina oborina u iznosu od 1.550 mm izmjerena je 1995. godine na klimatološkoj stanici Abrami, dok je najmanja godišnja količina oborina u iznosu od 567 mm izmjerena 1983. na klimatološkoj postaji Poreč. Treba naglasiti da godišnje oborine na tri izučavane postaje u slivu Mirne pokazuju snažnu regionalnu sličnost. Na osnovi te sličnosti primjenom metoda korelacije i regresije bilo je moguće pouzdano produžiti neke nizove te nadopuniti nekoliko godišnjih vrijednosti za godine u kojima su nedostajali mjereni podaci.

U posljednje vrijeme vrlo intenzivno se raspravlja o postojanju globalnih klimatskih promjena u cijelome svijetu. Ukoliko one zaista postoje, njihov bi se utjecaj mogao odraziti i na hidrološke karakteristike duž toka rijeke Mirne. Sa svrhom da se ustanovi njihova eventualna pojava u razmatranom području, u ovom poglavlju će se analizirati nizovi godišnjih oborina i srednjih godišnjih temperatura zraka izmjerenih na klimatološkim postajama Abrami, Celega i Poreč.

Na Slici 2 nalazi se grafički prikaz godišnjih oborina i srednjih godišnjih temperatura zraka izmjerenih na klimatološkoj postaji Abrami u razdoblju 1981.-2007. Prosječna godišnja temperatura zraka u cijelom razmatranom razdoblju iznosila je 12,4 °C, s time da je minimalna vrijednost iznosila 11,5 °C (1984.), a maksimalna 13,4 °C (1994; 2002.). Tijekom razmatranog razdoblja uočen je statistički značajni trend porasta srednjih godišnjih temperatura u iznosu od 0,9 °C.

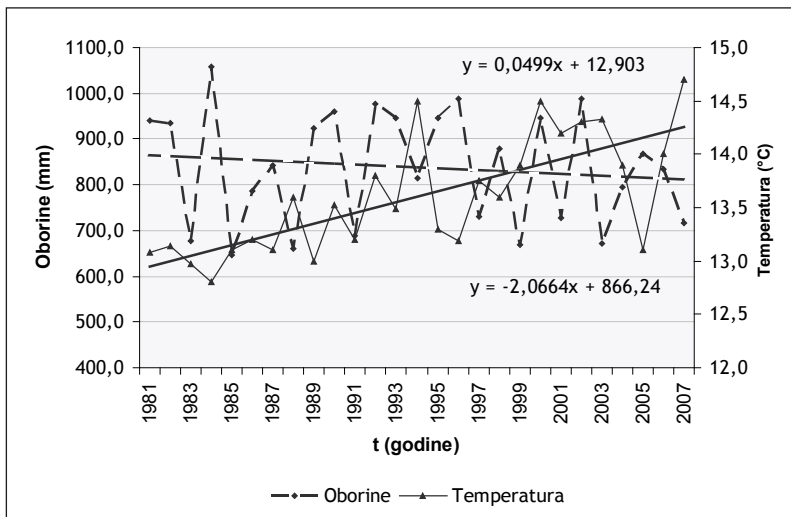
Prosječna oborina u razdoblju 1981.-2007. iznosila je 1.078 mm, dok se u pojedinim podrazdobljima kretala između minimalne 831 mm (1985.) i maksimalne 1.550 mm (1995.) vrijednosti. U prosjeku se najniže temperature zraka javljaju u siječnju 3,5°C, a najviše u srpnju 22,2°C. Tokom godine pojavljuju se dva oborinska maksimuma, u listopadu i lipnju, od kojih je naglašeniji u listopadu. Oborinski minimum javlja se u prosjeku u srpnju.



Slika 2. Hod srednjih godišnjih temperatura zraka i god. količina oborina za postaju Abrami (1981.-2007.)

Na Slici 3 nalazi se grafički prikaz srednjih godišnjih oborina i srednjih godišnjih temperatura zraka izmjerenih na klimatološkoj postaji Celega u razdoblju 1981.-2007. Prosječna godišnja temperatura zraka u cijelom razmatranom razdoblju iznosila je 13,6 °C, s time da je minimalna vrijednost iznosila 12,8 °C (1984.), a maksimalna 14,7 °C (2007.). Tijekom razmatranog razdoblja uočen je statistički značajni trend porasta srednjih godišnjih temperatura u iznosu od 1,3 °C.

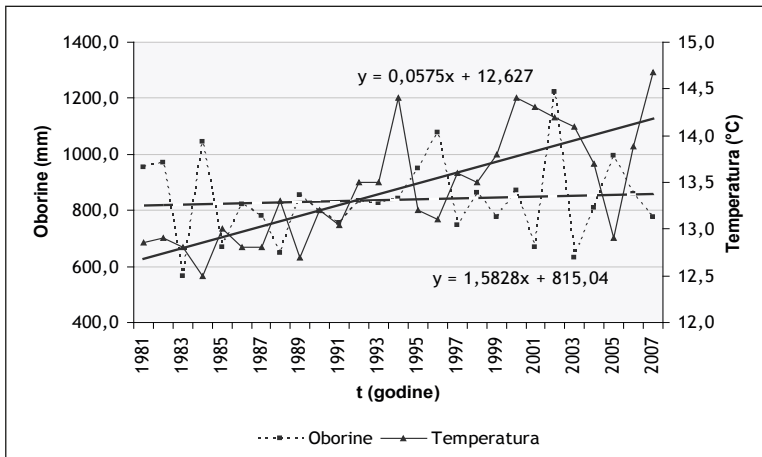
Prosječna oborina u razdoblju 1981.-2007. iznosila je 837 mm, dok se u pojedinim podrazdobljima kretala između minimalne 647 mm (1985.) i maksimalne 1.057 mm (1984.) vrijednosti. U prosjeku se najniže temperature zraka javljaju u siječnju i veljači, 4,9°C, a najviše u srpnju, 23,4°C. Tijekom godine pojavljuju se dva oborinska maksimuma, u listopadu i u lipnju, od kojih je naglašeniji onaj u listopadu. Oborinski minimum javlja se u prosjeku u srpnju.



Slika 3. Hod srednjih godišnjih temperatura zraka i god. količina oborina za postaju Celega (1981.-2007.)

Na Slici 4 nalazi se grafički prikaz srednjih godišnjih oborina i srednjih godišnjih temperatura zraka izmjerenih na klimatološkoj postaji Poreč u razdoblju 1981.-2007. Prosječna godišnja temperatura zraka u cijelom razmatranom razdoblju iznosila je 13,4 °C, s time da je minimalna vrijednost iznosila 12,5 °C (1984.), a maksimalna 14,7 °C (2007.). Tijekom razmatranog razdoblja uočen je statistički značajni trend porasta srednjih godišnjih temperatura u iznosu od 1,3 °C.

Prosječna oborina u razdoblju 1981.-2007. iznosila je 837 mm dok se u pojedinim podrazdobljima kretala između minimalne 567 mm (1983.) i maksimalne 1.224 mm (2002.) vrijednosti. U prosjeku se najniže temperature zraka javljaju u siječnju i veljači, 4,8°C, a najviše u srpnju, 23,1°C. Tijekom godine pojavljuju se dva oborinska maksimuma, u listopadu i u lipnju, od kojih je naglašeniji onaj u listopadu. Oborinski minimum javlja se u prosjeku u srpnju.



Slika 4. Hod srednjih godišnjih temperatura zraka i god. količina oborina za postaju Poreč (1981.-2007.)

4. Analiza hidroloških opažanja na rijeci Mirni

Značajke razdiobe bilance voda sliva Mirne mogu se sagledati iz prikaza njenih osnovnih hidroloških značajki s hidroloških postaja koje su, obzirom na duljinu toka i pripadajuću slivnu površinu, relativno povoljno locirane uzduž toka Mirne.

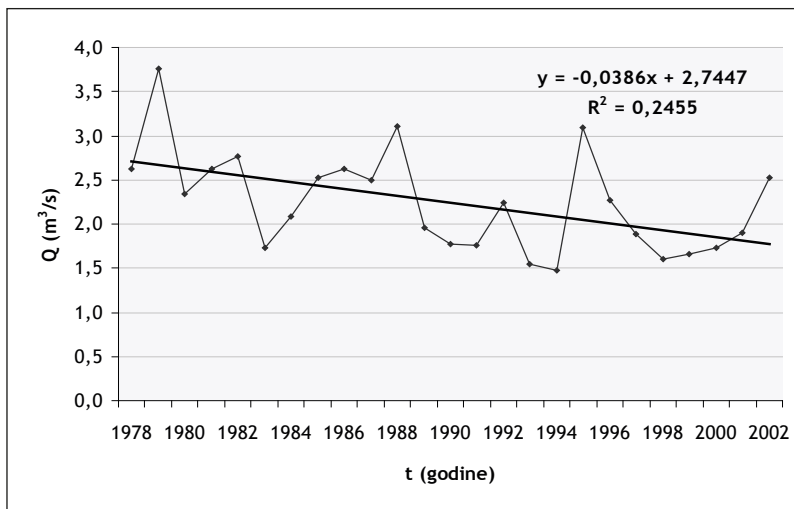
Najuzvodnija hidrološka postaja je Buzet – Mirna. Na toj lokaciji je vrlo širok proticajni profil Mirne, što utječe na hidrološka stanja malih voda. Hidrološka postaja Motovun – Mirna nalazi se na reguliranom toku Mirne te ima stabilni hidrološki profil i aktivna je od kraja 1977. g. Nizvodno od Motovuna nalazi se postaja Portonski most – Mirna osnovana 1886. godine, po duljini motrenja i okolnosti da prihvaća gotovo sve vode sliva Mirne ujedno i repna postaja za Mirnu. Ta je postaja locirana na reguliranom koritu Mirne [6].

4.1. Hidrološka postaja Buzet-Mirna

Provedene su obrade hidroloških podataka koje obuhvaćaju analize srednjih i minimalnih mjesečnih i godišnjih protoka za razdoblje od 1978. - 2002. sa statističkim parametrima. Osim prosječnih vrijednosti proračunate su minimalne vrijednosti, protoci određene vjerojatnosti prekoračenja, protoci maksimalne vrijednosti, standardna devijacija i koeficijent varijacije. Prosječni godišnji protok za razdoblje 1978. – 2002. iznosio je 2,24 m³/s.

Hod srednjih godišnjih protoka na stanici Buzet - Mirna za niz od 1978. do 2002. dan je na Slici 5. Vidljivo je da postoji trend opadanja protoka (38,6 l/s godišnje). Iz slike je vidljivo da srednje godišnje protoke variraju u granicama od 1,47 m³/s (1994.g.) do 3,76 m³/s (1979.).

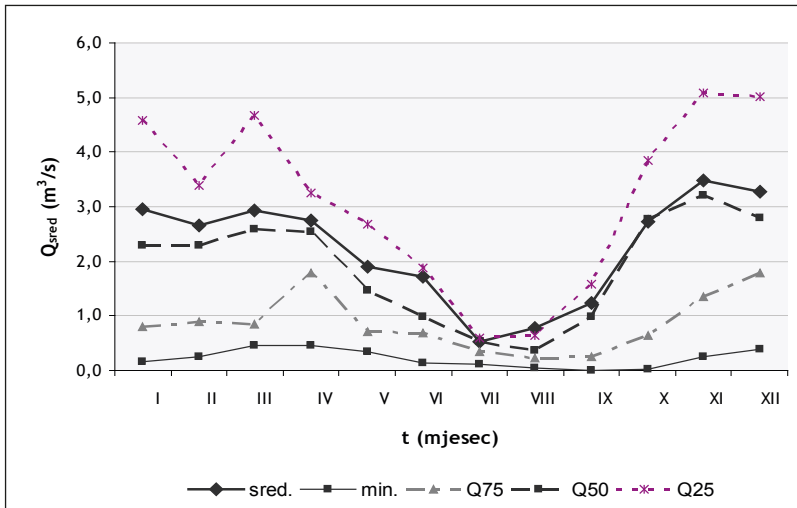
Statistička značajnost trenda provjerena je t-testom koji daje vrijednost t-parametra 2,74, što je veće od kritične vrijednosti od 2,06 za 95%-tnu razinu sigurnosti i niz od 25 godina.



Slika 5. Trend kolebanja srednjih godišnjih protoka s postaje Buzet – Mirna za razdoblje 1978. - 2002.

Slika 6 prikazuje statističke parametre srednjih mjesečnih protoka rijeke Mirne na postaji Buzet za razdoblje od 1978. do 2002. Osim prosječnih vrijednosti (sred), prikazane su minimalne vrijednosti (min), protoci vjerojatnosti prekoračenja 75% (Q75), protoci vjerojatnosti prekoračenja 50% (Q50 ili medijan) i protoci vjerojatnosti prekoračenja 25% (Q25). Može se reći da su protoci Q75 reprezentativni za „prosječno“ suhu godinu, a Q25

za „prosječno“ vlažnu godinu. Prosječni srednji mjesečni protoci su najveći u studenome (3,47 m³/s), a najmanji u srpnju (0,6 m³/s).

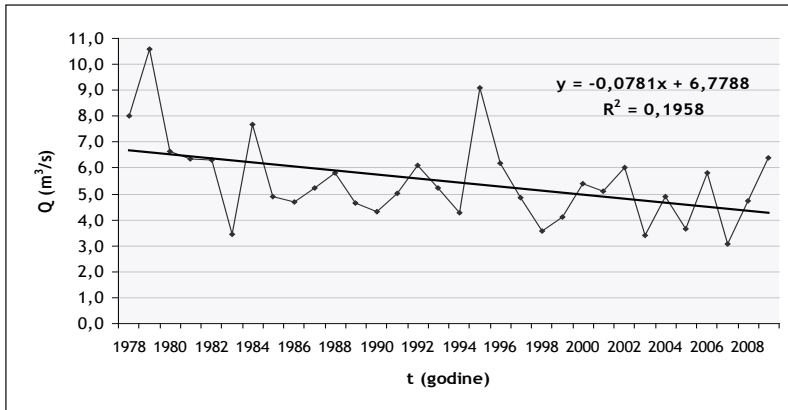


Slika 6. Statistički parametri srednjih godišnjih protoka s postaje Buzet – Mirna za razdoblje 1978. - 2002.

4.2. Hidrološka postaja Motovun-Mirna

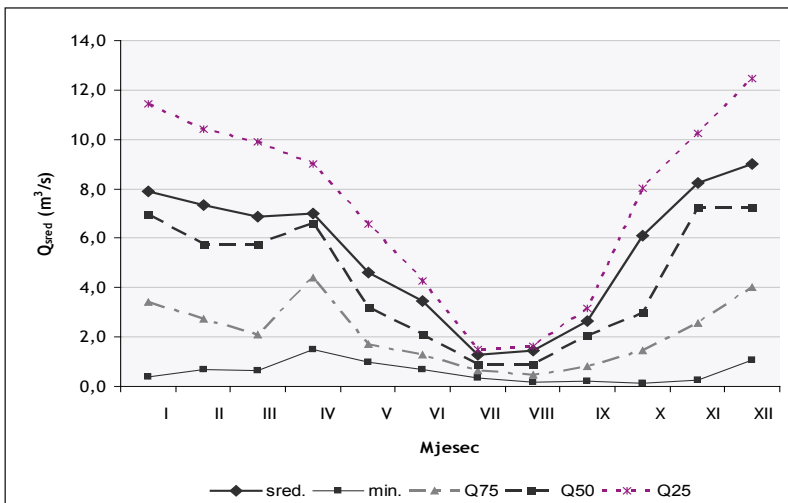
Provedene su obrade hidroloških podataka koje obuhvaćaju analize srednjih i minimalnih mjesečnih i godišnjih protoka za razdoblje 1978. - 2009. sa statističkim parametrima. Osim prosječnih vrijednosti, proračunate su minimalne vrijednosti, protoci određene vjerojatnosti prekoračenja, protoci maksimalne vrijednosti, standardna devijacija i koeficijent varijacije. Prosječni godišnji protok za razdoblje 1978. – 2009. iznosio je 5,49 m³/s.

Hod srednjih godišnjih protoka na stanici Motovun - Mirna za niz od 1978. do 2009. dan je na Slici 7. Vidljivo je da postoji trend opadanja protoka (78,1 l/s godišnje). Iz slike je vidljivo da srednje godišnje protoke variraju od 3,09 m³/s (2007.) do 10,60 m³/s (1979.). Statistička značajnost trenda je provjerena t-testom koji daje vrijednost t-parametra 2,70, što je veće od kritične vrijednosti od 2,04 za 95%-tnu razinu sigurnosti i niz od 32 godine.



Slika 7. Trend kolebanja srednjih godišnjih protoka s postaje Motovun – Mirna za razdoblje 1978. - 2009.

Slika 8 prikazuje statističke parametre srednjih mjesečnih protoka rijeke Mirne na postaji Motovun za razdoblje od 1978. do 2009. Osim prosječnih vrijednosti (sred), prikazane su minimalne vrijednosti (min), protoci vjerojatnosti prekoračenja 75% (Q75), protoci vjerojatnosti prekoračenja 50% (Q50 ili medijan) i protoci vjerojatnosti prekoračenja 25% (Q25). Može se reći da su protoci Q75 reprezentativni za „prosječno“ suhu godinu, a Q25 za „prosječno“ vlažnu godinu. Prosječni srednji mjesečni protoci su najveći u prosincu (9,0 m^3/s), a najmanji u srpnju (1,49 m^3/s).



Slika 8. Statistički parametri srednjih godišnjih protoka s postaje Motovun – Mirna za razdoblje 1978. - 2009.

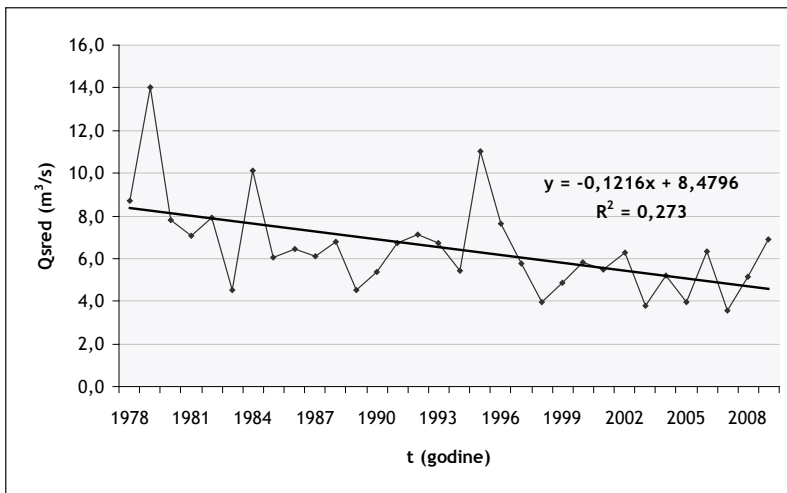
4.3. Hidrološka postaja Portonski most-Mirna

Provedene su obrade hidroloških podataka koje obuhvaćaju analize srednjih i minimalnih mjesečnih i godišnjih protoka za razdoblje 1978. - 2009. sa statističkim parametrima Osim prosječnih vrijednosti, proračunate su minimalne vrijednosti, protoci određene vjerojatnosti prekoračenja, protoci maksimalne vrijednosti, standardna devijacija i koeficijent varijacije.

Prosječni godišnji protok za razdoblje 1978. – 2009. iznosio je 6,47 m³/s.

Hod srednjih godišnjih protoka na stanici Portonski most - Mirna za niz od 1978. do 2009. dan je na Slici 9. Vidljivo je da postoji trend opadanja protoka (121,6 l/s godišnje). Iz slike je vidljivo da srednje godišnje protoke variraju u jako velikim granicama – od 3,55 m³/s (2007.) do 14,00 m³/s (1979.).

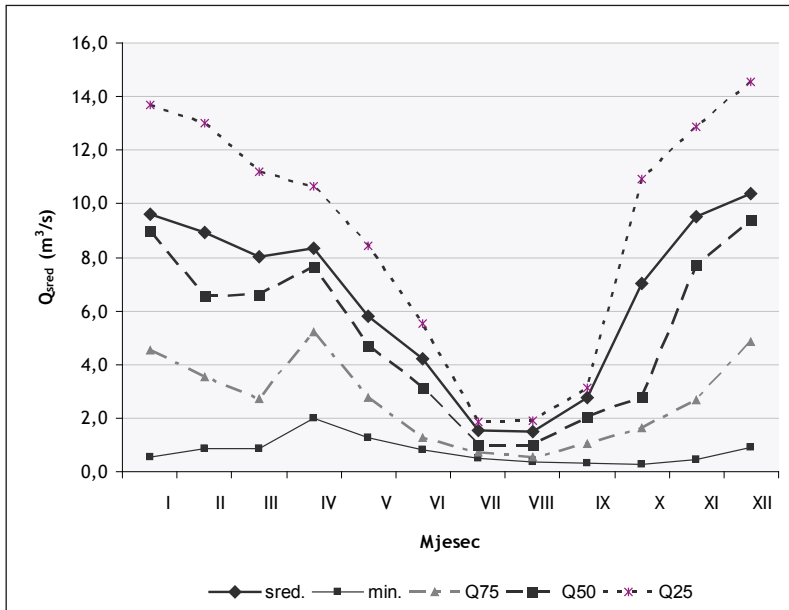
Statistička značajnost trenda je provjerena t-testom koji daje vrijednost t-parametra 3,36, što je veće od kritične vrijednosti od 2,04 za 95%-tnu razinu sigurnosti i niz od 32 godine.



Slika 9. Trend kolebanja srednjih godišnjih protoka s postaje Portonski most – Mirna za razdoblje 1978. - 2009.

Slika 10 prikazuje statističke parametre srednjih mjesečnih protoka rijeke Mirne na postaji Portonski most za razdoblje od 1978. do 2009. Osim prosječnih vrijednosti (sred), prikazane su minimalne vrijednosti (min), protoci vjerojatnosti prekoračenja 75% (Q75), protoci vjerojatnosti prekoračenja 50% (Q50 ili medijan) i protoci vjerojatnosti prekoračenja 25% (Q25). Može se reći da su protoci Q75 reprezentativni za „prosječno“ suhu godinu, a Q25

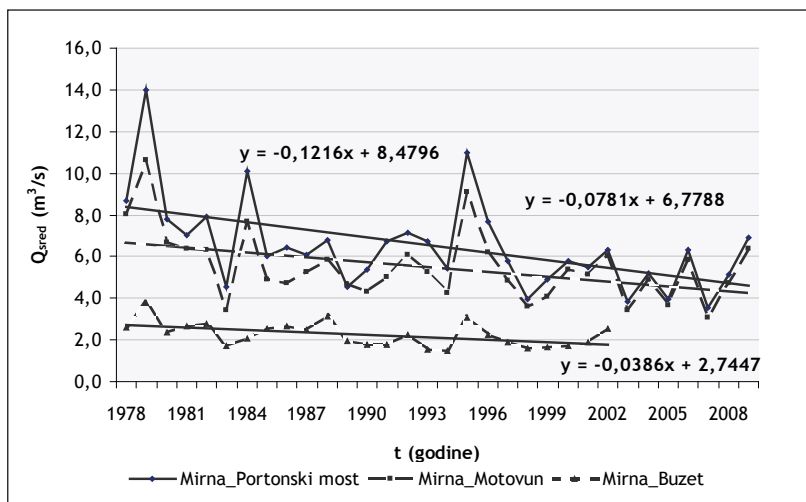
za „prosječno“ vlažnu godinu. Prosječni srednji mjesečni protoci su najveći u prosincu (10,40 m³/s), a najmanji u kolovozu (1,52 m³/s).



Slika 10. Statistički parametri srednjih godišnjih protoka s postaje Portonski most – Mirna za razdoblje 1978. – 2009.

4.4. Usporedba i analiza međuodnosa godišnjih i mjesečnih protoka s hidroloških postaja

Radi uvida u vodni režim duž toka Mirne provedena je i usporedba srednjih godišnjih protoka tijekom razdoblja 1978. - 2009., i to postaje Motovun – Mirna, Portonski most – Mirna te za razdoblje 1978. – 2002. za postaju Buzet – Mirna. Prikaz njihovih hodova dan je na Slici 11 na kojoj su prikazani i proračunati trendovi. Vidljivo je da se hodovi i trendovi srednjih godišnjih protoka prate relativno dobro.

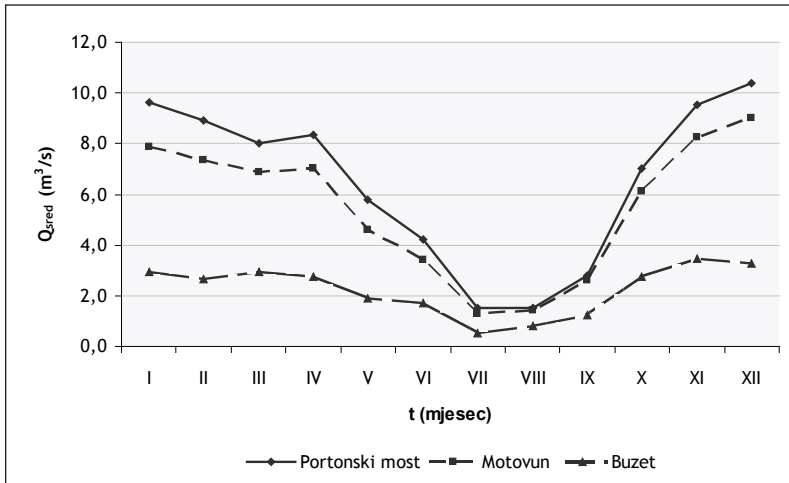


Slika 11. Hod srednjih godišnjih protoka hidroloških postaja na Mirni

Uočljivo je da je kod svih postaja izražen trend opadanja srednjih godišnjih protoka. Opadanje je najmanje izraženo kod profila Motovun – Mirna od 1,4%, a najviše na profilu Portonski most – Mirna od 1,8%, dok je na profilu Buzet – Mirna trend smanjenja od 1,4%. Dijelom se taj trend može protumačiti povećanom potrošnjom vlastitih voda u slivu (povećanje vodoopskrbnih potreba sa pripadajućih izvorišta u slivu, pojave uzimanja vode iz korita za potrebe navodnjavanja manjih poljoprivrednih površina), a dijelom je uzrokovan trendom smanjenja godišnjih količina oborina (kako je prikazano u prethodnom poglavlju za tri meteorološke stanice).

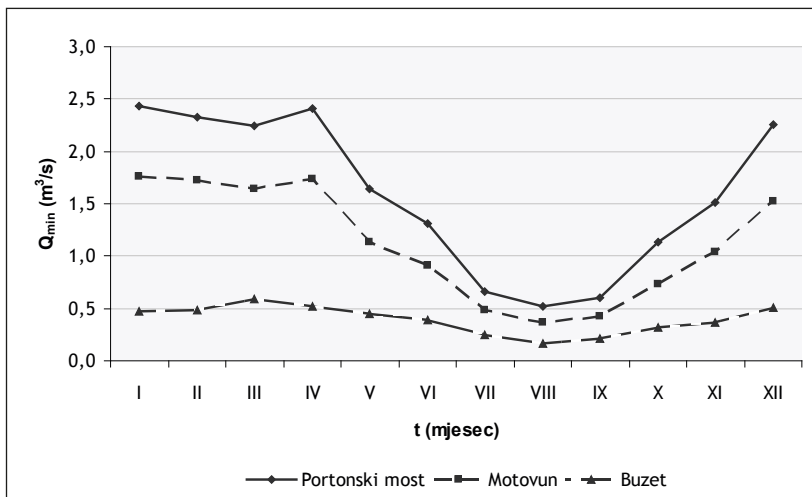
Unutargodišnje raspodjele srednjih i minimalnih mjesečnih protoka za analizirane postaje prikazane su na Slici 12 i 13. Iz prikazanih je slika vidljivo da postoje velike razlike prosječnih srednjih mjesečnih protoka postaja Portonski most i Motovun u odnosu na postaju Buzet. Utvrđeno je da se prosječno najmanje mjesečne protoke javljaju u dva mjeseca, i to u srpnju i kolovozu. Prosječno najveće mjesečne protoke javljaju se u studenome, prosincu i siječnju.

Tijekom sušnih razdoblja (srpanj – rujana) smanjuju se razlike između prosječnih protoka susjednih profila na Mirni, dok su tijekom vodnijih razdoblja, kada je veći utjecaj dotoka s međusliva, te razlike naglašenije. Vidljivo je podudaranje pojavljivanja kritičnih sušnih (druga polovina ljeta), kao i vodnih razdoblja kod kojih je izrazitiji kasnojesenski maksimum, kao i sekundarni proljetni (travanjski) maksimum.



Slika 12. Hod srednjih mjesečnih protoka hidroloških postaja Portonski most, Motovun (1978. - 2009.) i Buzet (1978. - 2003.)

Iz Slike 13 je vidljivo da minimalne srednje mjesečne protoke na postajama Mirne mogu poprimiti vrlo male vrijednosti protoka. Na postaji Buzet dolazi do pojave gotovo potpunog presušivanja vodotoka ($0,16 \text{ m}^3/\text{s}$), dok minimalna srednja mjesečna protoka za travanj na najvodnijem profilu Portonski most – Mirna doseže $2,41 \text{ m}^3/\text{s}$.

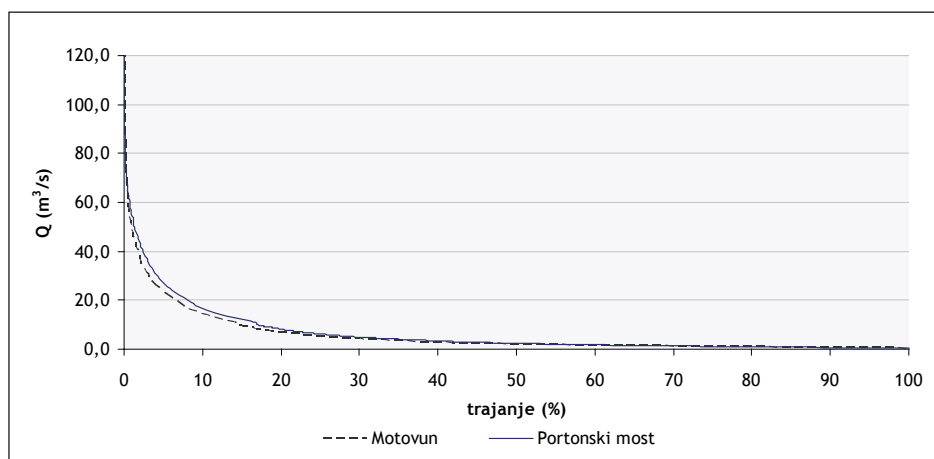


Slika 13. Hod minimalnih srednjih mjesečnih protoka hidroloških postaja Portonski most, Motovun (1978. - 2009.) i Buzet (1978. - 2003.)

4.5. Analiza učestalosti i trajnosti srednjih dnevnih protoka

Radi detaljnijeg uvida u vodni režim nekoga vodotoka provode se i analize učestalosti i trajnosti podataka o dnevnim protocima. Ta je analiza u slivu Mirne provedena za stanice Motovun i Portonski most za razdoblje od 1980. – 2009., kao i za registriranu sušnu 2007. godinu u analiziranom razdoblju te je prikazana u Tablici 2.

Na Slici 14 prikazan je skupni prikaz za zajedničko razdoblje obrade (1980.-2009.). Vidljivo je da Mirna ima stalne i značajne male vode. Na osnovu provedenih analiza krivulja trajnosti određene su i karakteristične protoke 80% i 95% - tne trajnosti potrebnih za proračun ekološki prihvatljivog protoka (EPP-a).



Slika 14. Usporedni prikaz krivulja trajnosti srednjih dnevnih protoka za hidrološke postaje Motovun i Portonski most u slivu rijeke Mirne (1980. – 2009.)

Tablica 2. Karakteristične protoke 80% i 95% trajnosti za hidrološke postaje Motovun i Portonski most

Mjerna postaja	Sušna 2007.		1980.-2009.	
	Q _{80%}	Q _{95%}	Q _{80%}	Q _{95%}
	m ³ /s			
Motovun	0,697	0,149	0,784	0,396
Portonski most	0,795	0,339	0,879	0,494

U Tablici 3 prikazane su karakteristične vrijednosti krivulja trajnosti (postotak prosječne zastupljenosti dana sa srednjim dnevnim protocima većim od 0,05; 0,1; 0,5; 1; 5 i 10 m³/s).

Tablica 3. Usporedni prikaz prosječnih trajnosti (% dana) srednjih dnevnih protoka za hidrološke postaje Motovun i Portonski most u slivu rijeke Mirne

Mjerna postaja	Prosječne trajnosti (%)						
	>0 m ³ /s	>0,05 m ³ /s	>0,1 m ³ /s	>0,5 m ³ /s	>1,0 m ³ /s	>5,0 m ³ /s	>10,0 m ³ /s
Motovun	100,0%	100,0%	99,8%	88,9%	70,9%	25,6%	13,8%
Portonski most	100,0%	100,0%	100,0%	92,5%	74,3%	29,1%	16,7%

4.6. Određivanje ekološki prihvatljivog protoka (EPP)

U Hrvatskoj, kao i u mnogim državama svijeta nije u potpunosti razrađena metodologija definiranja ekološki prihvatljivog protoka u vodotocima nizvodno od vodozahvata koja bi uvažavala relevantne morfometrijske i bio-ekološke značajke vodotoka i njegovog zaobalja. U praksi se ovaj zadržani protok, često označen i kao „biološki minimum“, propisuje administrativno ili na temelju raspoloživih hidroloških obrada i podataka.

Kako trenutno u Hrvatskoj nije moguća primjena složenih ekoloških metoda i/ili modela biološkog odgovora zbog nedovoljne fundamentalne bio-ekološke i biocentričke istraženosti vodotoka, ovdje će se koristiti metodološki pristup prema Mišetiću i Pavlinu [7] te usporedno prema Bonacciu [8]. Prema njima, predlaže se upotreba Matthey-evih formula. Metoda je razvijena za primjenu na vodotocima izrazito strmih obala, kao i na relativno malim vodotocima i njihovim odgovarajućim malim protocima kakvi su i istarski vodotoci. No, nužno je precizno određivanje nekih elemenata potrebnih za primjenu te metode, kako u smislu preciziranja trajanja (292 dana ili 80% trajanje; 347 dana ili 95% trajanje), tako i preciziranja područja primjenjivosti. Naime, metoda je predviđena da se primjenjuje na vodotocima ili dijelovima vodotoka za koje postoje dostatni hidrološki podaci, a jedan od kriterija je i da vrijednost EPP mora biti veća ili jednaka 50 l/s [7].

Procjena hidroloških elemenata EPP-a izvršit će se za dva mjerodavna profila rijeke Mirne:

- Motovun – Mirna
- Portonski most – Mirna

Osnovni hidrološki parametri navedenih profila prikazani u Tablici 4 dobiveni su obradom podataka o srednjim dnevnim protocima.

Tablica 4. Osnovni hidrološki parametri na postajama Motovun i Portonski most (1978. - 2007.)

Mjerna postaja	SQ	Q _{MN}	Q _{80%}	Q _{95%}
	m ³ /s			
Motovun	0,549	0,276	0,784	0,396
Portonski most	0,650	0,446	0,879	0,494

gdje su: **SQ** – srednji godišnji protok, **Q_{MN}** – srednja vrijednost minimalnih godišnjih protoka, **Q_{80%}** - protok 80%-tnog trajanja na srednjoj krivulji trajanja (tj. protok 292. dana), **Q_{95%}** - protok 95%-tnog trajanja na srednjoj krivulji trajanja (tj. protok 347. dana). U nastavku se prikazuje nekoliko izraza za određivanje EPP-a, od kojih će se prihvatiti onaj koji zahtjeva najveću vrijednost minimalnog protoka.

Za vodotoke izrazito strmih obala preporučuje se koristiti izraz prema Matthey-u:

- u slučaju srednjeg protoka (SQ) iznad 5,0 m³/s (neke strane literature daju graničnu vrijednost „iznad 3,0 m³/s“), odnosno za veće vodotoke:

$$Q_{E1} = 0.35 \times Q_{95\%} + 75 \text{ [l/s]} \quad (1)$$

gdje je:

Q_{E1} – minimalni protok, a

Q_{95%} = Q₃₄₇ - protok 347. dana srednje krivulje trajanja.

Slično prethodnom izrazu, Bonacci za „veće vodotoke“ preporučuje [3]:

$$Q_{E2} = 0.25 \times Q_{80\%} + 75 \text{ [l/s]} \quad (2)$$

gdje je:

Q_{E2} – minimalni protok, a

Q_{80%} = Q₂₉₂ - protok 292. dana srednje krivulje trajanja.

Bonacci (2003.) također daje izraz za alarmantnu graničnu vrijednost EPP-a koja predstavlja najnižu trenutačnu vrijednost protoka ispod koje se ne smije ići, prema sljedećem izrazu:

$$Q_0 = 0.2 \times Q_{80\%} \text{ [l/s]} \quad (3)$$

gdje je:

Q_0 – minimalni protok, a

$Q_{80\%}$ = Q292 - protok 292. dana srednje krivulje trajanja.

Tablica 5. Rezultati proračuna ekološki prihvatljivog protoka EPP Mirne

Mjerna postaja		za SQ > 5 m ³ /s *prema Mišetić	za SQ > 5 m ³ /s *prema Bonacci	Alarmantna *prema Bonacci	EPP
		Q _{E1}	Q _{E2}	Q _{E3}	Q _E = max(Q _{E1} , Q _{E2} , Q _{E3})
Motovun	l/s	213,6	271,0	156,8	271,0
Portonski most	l/s	248,0	300,0	176,0	300,0

U Tablici 5 dati su rezultati proračuna za ekološki prihvatljivi protok na rijeci Mirni na postajama ;Motovun i Portonski most. Ekološki prihvatljivi protok nizvodno od vodomjerne postaje **Motovun** iznosi **271,0 l/s**, a nizvodno od **Portonskog mosta** iznosi **300,0 l/s**.

Navedene vrijednosti EPP–a su procijenjene vrijednosti dobivene na temelju hidroloških podataka spomenutih hidroloških postaja u uvjetima kad EPP nije definiran, a niti se primjenjuje na zahvatima za vodoopskrbu na izvorima u slivu Mirne, kao ni za akumulaciju Butoniga. Za pretpostaviti je da su dane vrijednosti za cca 100 l/s manje nego li bi bile da su pri analizi uzeti u obzir i podaci o korištenju voda koji smanjuju prirodne vrijednosti protoka.

Konačnu vrijednost ekološki prihvatljivog protoka Mirne definirat će biolozi na temelju danih hidroloških procjena te stanja biologije vodotoka koji će biti prikazani u studiji „Definiranje ekološki prihvatljivog protoka Mirne“ čiji se završetak izrade predviđa u prosincu 2011.

5. Zaključci

Rijeka Mirna je najznačajniji vodotok na istarskom poluotoku. Zbog svog “bogatstva” vodom, u slivu rijeke Mirne predviđena je izgradnja nekoliko velikih akumulacija koje bi služile za obranu od poplava nizinskog dijela Mirne i za navodnjavanje područja Bujštine i Poreštine.

Zbog uvida u vodni režim duž toka Mirne provedena je usporedba srednjih godišnjih protoka za tri vodomjerne postaje (Motovun, Buzet i Portonski most).

Analizom je uočeno da je kod svih postaja izražen trend opadanja srednjih godišnjih protoka. Opadanje je najmanje izraženo kod profila Motovun – Mirna od 1,4%, a najviše na profilu Portonski most – Mirna od 1,8%, dok je na profilu Buzet – Mirna trend smanjenja od 1,4%. Dijelom se taj trend može protumačiti povećanom potrošnjom vlastitih voda u slivu (povećanje vodoopskrbnih potreba sa pripadajućih izvorišta u slivu, pojave uzimanja vode iz korita za potrebe navodnjavanja manjih poljoprivrednih površina), a dijelom je uzrokovan trendom smanjenja godišnjih količina oborina.

Problematika određivanja EPP za Mirnu nizvodno od postaja Motovun i Portonski most obrađena je u okviru raspoloživih podataka. Budući da trenutno u Hrvatskoj nije moguća primjena složenih ekoloških metoda i/ili modela biološkog odgovora zbog nedovoljne fundamentalne bio-ekološke i biocentričke istraženosti vodotoka, u ovom je radu za određivanje EPP-a korišten metodološki pristup prema Mišetiću i Pavlinu [7] te usporedno prema Bonacciu [8].

Prema proračunima provedenim u ovom radu, EPP nizvodno od vodomjerne postaje Motovun iznosi 271,0 l/s, a nizvodno od Portonskog mosta iznosi 300 l/s.

6. Literatura

- [1] Bonacci, O: Hazards caused by natural and anthropogenic changes of catchment area in karst. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4:655-661., 2004.
- [2] Bonacci, O: *Karst hydrology with special references to the Dinaric karst.* Springer Verlag, Berlin, 184 str., 1987.
- [3] Bonacci, O: Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of the River Zrmanja. *Hydrological Sciences Journal* 44(3):373-386., 1999.
- [4] Hisert RA (1994.) A multiple tracer approach to determine the ground water and surface water relationships in the Western Santa Fe River, Columbia County, Florida. Ph.D. Dissertation, Department of Geology, University of Florida, Gainesville, FL 32601.
- [5] Katz BG, DeHan RS, Hirten JJ, Catches JS: Interactions between ground water and surface water in the Suwannee river basin, Florida. *Journal of the American Resources Association* 33(6):1237-1254, 2007.
- [6] Rubinić, J., *Vodni resursi i značajke kopnenih voda Istre u sušnim razdobljima*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2005.

-
- [7] Mišetić S, Pavlin Ž: Pristup definiranju ekološki prihvatljivog protoka (EPP) u Republici Hrvatskoj, Velike i male vode, Zbornik radova, DGI Zagreb i HHD, Zagreb 2004.
- [8] Bonacci, O: Ekohidrologija vodnih resursa i otvorenih vodotoka, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu i IGH d.d. Zagreb, 2003.
- [9] Rubinić J; Ožanić N: Razvoj hidroloških istraživanja i upravljanja vodnim resursima u kršu na primjeru istarskog područja, Zbornik radova V. međunarodnog skupa Društvo i tehnologija, Opatija, 1998.
- [10] Matković B i suradnici, Idejno rješenje melioracije i navodnjavanja Bujštine, Institut IGH d.d., Rijeka, 2011.

REGULACIJA VODOTOKA JELENSKA

REGULATION OF WATERCOURSE JELENSKA

Milan Mišćević, Nevenka Ožanić

Sažetak. Na zapadnim obroncima Moslavačkog gorja formira se sliv vodotoka Jelenska. Veličina sliva iznosi 35,7 km², a najviša kota sliva nalazi se na 438 m n. m.

U sadašnjem stanju, trasa vodotoka Jelenska izuzetno je zapuštena i zarasla, tako da svaki vodni val i manjeg povratnog perioda ugrožava stambene i gospodarske objekte izgrađene uz trasu korita. Poplavama su također ugrožene lijeva obala, na kojoj je planirana izgradnja osnovne škole i dječjeg vrtića, i desna obala na kojoj je planirano uređenje sportskog parka.

Zbog štetnog djelovanja voda predviđena je regulacija vodotoka Jelenska u užem izgrađenom dijelu općine Popovača u dužini od cca 920 m. U ovome je radu za dimenzioniranje korita korišten protok stogodišnjeg povratnog perioda koji iznosi $Q_{100}=66,00 \text{ m}^3/\text{s}$. Elementi trase vodotoka definirani su tako da se trasa najbolje uklopi u zatečeno stanje na terenu i zadovolje potrebe korisnika okolnog zemljišta u budućnosti.

U radu je pokazano da se predloženo korito obloženo kamenom može lijepo uklopiti u sportski park, a zajedno s predviđenim pratećim pješačkim mostićima i pravilnim izborom drveća uz korito može činiti jedinstvenu cjelinu.

Ključne riječi: vodotok Jelenska, korito, poplava, regulacija, nasip

Abstract. Watercourse Jelenska is formed on the western slopes of the Moslavačka Gora Mountains. The catchment area is about 35,7 km², and the highest point of the basin is located at 438 m above sea level.

In its present condition, the route of watercourse Jelenska is very neglected and overgrown, so each flood wave, even the one with a smaller return period, threatens residential and commercial buildings constructed along the route of the water bed. The floods have also affected both the left bank, where primary school and kindergarten construction is planned, and the right bank, where a

sports park is to be arranged.

Because of the harmful effects of water, a regulation of watercourse Jelenska is to be performed in the narrow part of the municipality Popovača in a length of approximately 920 m. In this paper, the project design uses a 100 year return period ($Q_{100}=66,00 \text{ m}^3/\text{s}$) discharge. Elements of the river route have been defined so that river can fit into the existing situation in the field as well as possible and that at the same time it corresponds with future needs of users living in the surroundings.

The paper shows that the proposed water bed covered with stone can be easily incorporated into a sports park, together with accompanying pedestrian bridges and a proper choice of trees for shade along the Jelenska watercourse. So, the park and the school should not be separated, but incorporated into a single entity.

Keywords: *watercourse Jelenska, water bed, flood, regulation, embankment*

1. Uvod

Vodotok Jelenska sakuplja brdske vode sa sliva koji iznosi 35,7 km², a formira se na zapadnim obroncima Moslavačkog gorja s najvišom kotom od 438 m n.m. Razvijajući umjereno gustu hidrografsku mrežu usmjerenu u pravcu zapada, trasa potoka Jelenska u svom najvećem dijelu prati cestu i selo Gornja Jelenska sjeveroistočno od Popovače (Slika 1). Slivno područje izduženo je u smjeru sjeveroistok - jugozapad. Vodotok Jelenska teče kroz urbano područje općine Popovača do vodotoka Vlahinička koji se potom ulijeva u rijeku Lonju.

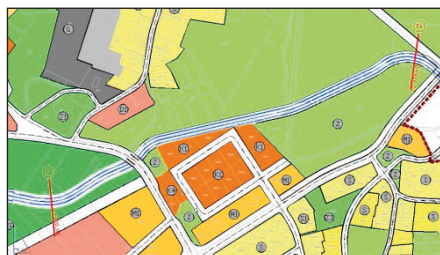
U sadašnjem stanju, trasa vodotoka Jelenska je izuzetno zapuštena i zarasla, tako da svaki vodni val i manjeg povratnog perioda ugrožava stambene i gospodarske objekte izgrađene uz trasu korita (Slika 2). Poplavama je ugroženo i lijevo zaobalje Jelenske – buduća građevinska zona prema DPU Općine Popovača (Slika 3), gdje je planirana izgradnja osnovne škole i dječjeg vrtića. Poljoprivredno zemljište nizvodno od analizirane dionice također je ugroženo poplavama, a reguliranjem korita omogućilo bi se njegovo maksimalno iskorištavanje. Situaciju dodatno pogoršava upuštanje velikih voda Save ustavom Prevlaka, čime se stvara uspor na ušću Vlahiničke i dugotrajna nemogućnost odvodnje poplavnog područja. Vodotok Jelenska meandrira, naročito na prostoru nizvodno od županijske ceste broj 3124 (Popovača - Kutina). Na tom dijelu dno je vrlo duboko ukopano te se kao posljedica toga javlja erodiranje obala i klizišta, što sve ukazuje na neriješeno pitanje odnosa pada i geomehaničkog sastava tla.



Slika 1. Slivno područje vodotoka Jelenska (35,7 km²)



Slika 2. Dionica vodotoka Jelenska, nizvodno od mosta Zg-Kt (nakon izvršenih pripremnih radova)



Slika 3. Položaj projektne dionice (od profila 1 – 59) u urbanom području naselja Popovača prema DPU



Slika 4. Uže urbano područje naselja Popovača i prikaz projektne dionice

Potrebno je dati rješenje zaštite od velikih voda kako bi se zaštitilo naselje Popovača, autocesta A3 te osigurala poljoprivredna proizvodnja na što većim površinama nizvodno od regulirane dionice (Slika 4). Regulaciju potoka Jelenska treba isprojektirati s posebnim osvrtom na stabilizaciju korita.

Treba spomenuti kako je pri odabiru rješenja regulacije vodotoka Jelenska trebalo voditi računa o zaštiti prirode. Naime, u koritu se vodotoka, sjeverno od naselja Donja Jelenska, naselilo više obitelji dabrova. Kako su staništa dobro zaštićena, može u pitanje doći izgradnja nasipa po trasi nizvodno. Ipak,

analizirana dionica vodotoka Jelenska u dužini od cca 920 m nalazi se u užem izgrađenom dijelu općine Popovača u blizini stambene zone i benzinske stanice, te se ne očekuje usmjeravanje aktivnosti dabrova na to područje, a regulacijom se neće zadirati u postojeća staništa [1].

2. Geomehanički istražni radovi i definiranje poprečnog presjeka

S padina Moslavačke gore prema rijeci Savi teče vodotok Jelenska koji uzvodno od mjesta Popovača prima pritoke Velika Kamenica, Mala Kamenica, Srnčev jarak, Tičarica, Široki jarak. Opća morfološka karakteristika šireg slivnog područja vodotoka Jelenska je pružanje grebena u pravcu sjeveroistok – zapad koji predstavljaju posljednje obronke Moslavačke gore i postupno se gube u Savskoj ravnici.

Sliv vodotoka Jelenska izgrađuju klastične naslage, glina i pijesak. Radi litološkog sastava reljef ima karakteristiku simetričnog i paralelnog pružanja grebena i dolina. U gornjem je toku korito vodotoka vrlo plitko i meandrirajuće, dok se u donjem toku korito dublje usjeca u vlastiti nanos. Padine su mjestimice strme i na njima se nalaze manje doline okomite na glavni pravac pružanja. U tim dolinama obično se nalaze manji procjedni izvori koji hrane povremene tokove.

Šire područje izgrađeno je iz slabopropusnih i nepropusnih naslaga pleistocenske i kvartarne starosti koje se sastoje iz gline, praha, prašinastog i glinovitog pijeska slabo graduiranog do jednoličnog, a vrlo rijetko se javlja i šljunak. Klastični sedimenti pliocena i starijeg kvartara imaju niski stupanj dijagenese i radi toga nisu otporni na djelovanje atmosferilija, a površinska zona raspadanja je znatna.

Stabilnost padina ovisi o položaju naslaga obzirom na nagib padina, o debljini površinske rastrošenosti, odnosu glinovitih, prašinih, pjeskovitih naslaga i o razini podzemne vode. Na tome području postoje relativno povoljni geomorfološki uvjeti. Rijetke su pojave klizanja. Zabilježena su neka manja plitka i polagana klizanja.

Heterogeni litološki sastav sedimenata pliocena i kvartala uvjetuje različita hidrogeološka svojstva. Izmjenjuju se nepropusne gline i slabo propusni glinoviti i prašinski pijesci i prašina. Radi takvog sastava te horizontalne i vertikalne promjene, nije konstatiran povezan nivo podzemne vode.

Lesne naslage u litološkome se smislu gotovo ne razlikuju od paludinskih naslaga i u njihov sastav ulazi prah, glina, pijesak – finozrni, jednolični do dobro graduirani. Debljina lesnih naslaga je mala, maksimalno do 6 m. Uže

područje istraživanja, odnosno zahvata nalazi se na sitnoklastičnim, uglavnom glinovitim naslagama gornjeg pliocena i kvartara.

Na analiziranom području razmatrane dionice izvršena je AC – terenska identifikacija i klasifikacija tla sa granulometrijskom obradom. Klasifikacija je izvršena na 6 bušotina ili šliceva. Geomehanički istražni radovi bili su indicirani sadašnjim stanjem korita [2].

Projektni zadatak ukazao je na nepodesan odnos pada korita i materijala. Nakon analize i merenja utvrđeno je da zatečeni pad korita iznosi oko 0,7 ‰, što u normalnim okolnostima ne predstavlja veliki pad. Međutim, trasa vodotoka Jelenska prolazi pretežno kroz loš material: anorganski prah niske plastičnosti s malim primjesama pjeskovite gline (Slika 5). Takav zatečeni sastav tla bio je osnovni uvjet za odabir rješenja regulacije spomenutog vodotoka.



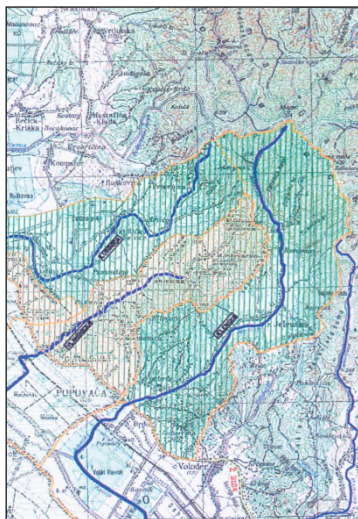
Slika 5. Anorganski prah niske plastičnosti s primjesama pjeskovite gline

3. Hidrološke karakteristike sliva vodotoka Jelenska

3.1. Sliv i oborine

Razvijajući umjereno gustu hidrografsku mrežu usmjerenu u pravcu zapada, trasa vodotoka Jelenska u svom najvećem dijelu prati cestu i selo Gornja Jelenska sjeveroistočno od Popovače. Slivno područje je izduženo u smjeru istok – zapad (Slika 6) [2].

Za potrebe hidrološke analize i proračuna mjerodavne protoke korištene su postojeće topografske i pedološke podloge te podaci o oborinama s najbliže ombrografske postaje – Kutina.



Slika 6. Karakteristične slivne površine brdskog i nizinskog dijela područja kazete 8 – Zapad

Na osnovu postojećih podataka određena je slivna površina i fizičko-geografski parametri, a na osnovu pedoloških podloga i podataka o zemljišnom pokrovu ostale karakteristike sliva potrebne za hidrološku analizu.

Oborinski režim ulazi među izrazito varijabilne klimatske karakteristike, kako prostorno, tako i vremenski. Ovisan je o geografskom položaju i općoj cirkulaciji atmosfere te modificiran lokalnim uvjetima kao što su reljef i udaljenost od mora. Ovdje su oborinske prilike prikazane srednjim mjesečnim i maksimalnim dnevnim količinama oborine, procjenom očekivanih maksimalnih dnevnih količina oborine te brojem dana s određenim dnevnim količinama oborine prema podacima s klimatološke postaje Opeke i kišomjerne postaje Brinjani iz razdoblja 1981. - 2005. bez 2002. Podaci s klimatološke postaje Opeke i kišomjerne postaje Brinjani dani su samo za prikaz oborinskog režima i usporedbu jer raspoložu novijim zabilježenim podacima, dok je za čitav sliv Jelske i dalje mjerodavna kišomjerna stanica Kutina (149 m n.m.) s podacima za razdoblje 1931. – 1960.

Na području Opeka godišnje u prosjeku padne 900,1 mm oborina, a u Brinjanima 828,2 mm. Od ukupne godišnje količine više oborina padne u toplom dijelu godine (54% Opeke, 57% Brinjani). Minimum oborina javlja se u hladnom dijelu godine (od listopada do ožujka), i to pomaknut prema kraju tog razdoblja. Srednja mjesečna količina oborina u veljači iznosi 50,3 mm u Opekama, a u Brinjanima 44,5 mm. Ovakve karakteristike godišnjeg

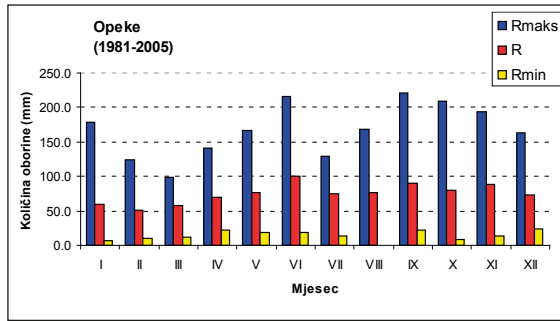
hoda količine oborina koji ima maksimum u toplom dijelu godine ukazuje na kontinentalni tip obrinskog režima.

U analiziranom 24-godišnjem razdoblju najveća zabilježena mjesečna količina oborina u Opekama iznosila je 220,9 mm (rujan 2001.), a u Brinjanim 250,4 mm (kolovoz 1989.). Te su vrijednosti bile gotovo tri puta veće od prosječnih oborina u tim mjesecima (Tablica 1).

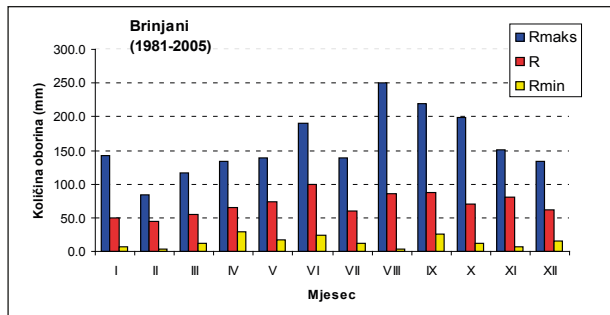
Tablica 1. Srednje mjesečne i godišnje količine oborina (R), pripadne standardne devijacije (s), koeficijenti varijacije (cv), maksimalna (R_{maks}) i minimalna (R_{min}) mjesečna i godišnja količina oborina za razdoblje: 1981. –2005. bez 2002.

Mj/ god.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
Opeke													
R(mm)	59.9	50.3	58.1	70.2	77.3	101.0	74.5	76.8	90.5	80.1	88.9	72.5	900.1
σ (mm)	39.3	28.7	22.2	28.6	43.8	52.0	31.6	41.1	49.2	46.4	48.9	38.5	121.8
c_v	0.66	0.57	0.38	0.41	0.57	0.51	0.42	0.53	0.54	0.58	0.55	0.53	0.14
R_{maks} (mm)	178.5	124.6	97.8	140.8	165.9	216.8	129.0	167.6	220.9	209.8	193.1	163.2	1090.0
R_{min} (mm)	6.4	10.1	11.9	22.3	18.4	19.4	14.1	0.4	22.2	9.1	13.8	23.1	659.1
Brinjani													
R(mm)	49.7	44.5	54.2	65.2	73.1	99.8	59.8	85.6	87.3	69.5	80.1	61.5	828.2
σ (mm)	31.9	25.6	23.7	25.3	36.5	46.1	31.1	56.4	51.3	45.0	44.2	35.5	112.8
c_v	0.64	0.58	0.44	0.39	0.50	0.46	0.52	0.66	0.59	0.65	0.55	0.58	0.14
R_{maks} (mm)	142.8	84.7	117.1	134.4	139.7	190.9	139.3	250.4	218.6	199.2	151.7	133.2	994.1
R_{min} (mm)	6.6	2.6	11.2	28.6	17.0	24.7	12.6	4.1	26.4	11.6	7.1	14.9	592.5

Prema vrijednostima koeficijenta varijacije (Tablica 1) mjesečne količine oborina značajno variraju od godine do godine, a godišnje količine oborina na obje postaje su stalnije od mjesečnih, s promjenjivošću od 14 %. O velikoj promjenjivosti mjesečnih količina oborina govore i podaci o najvećim i najmanjim izmjerenim količinama u analiziranom razdoblju, gdje se u pojedinim mjesecima mogu očekivati i do tri puta veće oborine od pripadnog mjesečnog srednjaka (Slika 7 i 8).



Slika 7. Godišnji hod srednjih, maksimalnih i minimalnih mjesečnih količina oborina za postaju Opeke, za razdoblje:1981. – 2005. bez 2002.



Slika 8. Godišnji hod srednjih, maksimalnih i minimalnih mjesečnih količina oborina za postaju Brinjani, za razdoblje:1981. – 2005. bez 2002.

Na postaji Opeke godišnje maksimalne dnevne količine oborina zabilježene su u svim mjesecima osim u veljači, svibnju i prosincu. U analiziranom razdoblju godišnji dnevni maksimum je najčešće zabilježen u lipnju (25% slučajeva), u studenom (21% slučajeva) te kolovozu (17% slučajeva). Po dva puta pojavio se u srpnju, rujnu i listopadu te po jednom u siječnju, ožujku i travnju. Najveća dnevna količina oborina izmjerena u razdoblju od 1981. -2005. iznosi 76,0 mm i izmjerena je u studenome 1987. godine (Tablica 2).

U Brinjanima se godišnje maksimalne količine oborina javljaju uglavnom u lipnju (25%) i kolovozu (33%) te rujnu i studenome (po 17%), a po jednom je u analiziranom razdoblju godišnji maksimum bio u travnju i srpnju. Najveća dnevna količina oborina iznosila je 140,4 mm i izmjerena je u kolovozu 1981. godine (Tablica 2).

Tablica 2. Maksimalne dnevne količine oborina Rd_{maks} (mm) za razdoblje 1981. - 2005. bez 2002.

Mj./god.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
Opeke													
Rd_{maks}	40.5	34.7	37.3	35.2	67.5	56.8	47.0	55.7	51.9	53.3	76.0	37.0	76.0
Brinjani													
Rd_{maks}	30.2	29.3	34.3	42.7	57.6	57.4	79.2	140.4	69.3	35.8	64.2	32.3	140.4

Procjene godišnjih maksimalnih dnevnih količina oborina provedene su za razdoblje 1981. - 2005. pomoću Jenkinsonove razdiobe ekstremnih vrijednosti. Dobivene su teorijske krivulje ekstrema za postaje Opeke i Brinjane:

$$\text{Opeke: } Rd_{maks} = 41,1 + 8,79 \cdot (1 - e^{-0,1y}) / 0,1$$

$$\text{Brinjani: } Rd_{maks} = 41,5 + 9,32 \cdot (1 - e^{-0,4y}) / (-0,4)$$

Vrijednosti parametara razdiobe Rd_0 , α i k nalaze se u Tablici 3, kao i vrijednosti procijenjenih maksimalnih dnevnih količina oborine koje se mogu očekivati jednom u 10, 20, 50 i 100 godina. Prema pripadnoj razdiobi, najveća dnevna količina oborina u Opekama (76,0 mm) može se očekivati vrlo rijetko, jednom u 157 godina, a najveća količina u Brinjanima (140,4 mm) jednom u 67 godina.

Tablica 3. Parametri razdiobe (Rd_0 , α i k) i procijenjene godišnje maksimalne dnevne količine oborina za razdoblje: 1981. - 2005. bez 2002.

Rd_0	α	k	Rd_{10}	d_{10}	Rd_{20}	d_{20}	Rd_{50}	d_{50}	Rd_{100}	d_{100}
Opeke										
41.1	8.8	0.1	58.9	3.6	63.8	4.2	69.7	5.0	73.7	5.5
Brinjani										
41.5	9.3	-0.4	75.1	8.9	93.8	12.9	127.3	20.2	161.8	28.0

Ovisno o količini oborina koje padnu u jednome danu, oborinski dani mogu se svrstati u različite klase. U ovome su radu prikazani dani s količinom oborina $\geq 10, 20, i 50$ mm (Tablica 4).

Tablica 4. Srednji mjesečni i godišnji broj dana s količinom oborina ≥ 10 , 20 i 50 mm za razdoblje 1981. - 2005. bez 2002.

Mj./god.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
OPEKE													
dani s količinom oborina $\geq 10,0$ mm													
Sred	2.6	1.6	2	2.6	2.8	3.2	2.7	2.7	3.3	3.2	2.9	2.5	32.1
σ	2.2	1.4	1.1	1.7	2.1	2.2	1.6	1.9	2	2.3	2	1.5	5.2
maks	8	5	4	6	6	9	6	8	8	8	8	6	41
dani s količinom oborina $\geq 20,0$ mm													
Sred	0.8	0.4	0.6	0.7	0.6	1.3	0.8	1.2	1.5	0.9	1.2	0.8	10.7
σ	0.9	0.6	0.7	0.8	0.9	1.5	0.8	0.8	1.3	0.9	1.1	0.9	3.5
maks	3	2	2	2	3	4	3	3	5	3	4	3	18
Mj./god.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
BRINJANI													
dani s količinom oborina $\geq 10,0$ mm													
Sred	1.6	1.6	1.7	2.3	2.4	3.5	2.4	2.8	3.0	2.8	2.8	2.2	29.0
σ	1.7	1.2	1.2	1.6	1.7	1.9	1.3	2.0	1.6	2.1	1.5	1.8	1.7
maks	7	5	4	6	8	7	6	8	8	8	5	6	7
dani s količinom oborina $\geq 20,0$ mm													
Sred	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.3	0.4	1.5	1.0	0.7	1.0	0.4	8.1
σ	0.4	0.4	0.6	0.6	1.0	1.2	0.6	1.4	1.1	0.9	1.0	0.6	3.2
maks	1	1	2	2	4	4	2	6	4	3	3	2	16

Prosječno se na području Opeka može očekivati oko 32 dana s količinom oborina $\geq 10,0$ mm, a u Brinjanima 29 dana. Srednji mjesečni broj takvih dana vrlo je sličan u svim mjesecima tijekom godine (2 do 3 dana). Broj dana s količinom oborina $\geq 10,0$ mm u jednoj godini kretao se od 22 do 41 dan u Opekama te od 19 do 36 dana u Brinjanima. Dani s količinom oborina $\geq 20,0$ mm prosječno se godišnje pojavljuju u oko 11 dana u Opekama i 9 dana u Brinjanima (Tablica 4). Na obje postaje najviše se takvih dana može očekivati u rujnu, i to oko 2 dana, dok se u ostalim mjesecima može očekivati prosječno jedan takav dan. Od srpnja do prosinca te u travnju mogu se očekivati po dva takva dana, a u ostalim mjesecima po jedan takav dan mjesečno. U Opekama je najveći broj dana s količinom oborina $\geq 20,0$ mm u mjesecu zabilježen u rujnu 2001. godine (5 dana), dok je u Brinjanima najveći broj takvih dana (6 dana) zabilježen u kolovozu 1989. Najveći broj dana s količinom oborina $\geq 20,0$ mm u jednoj godini zabilježen je na obje postaje 1993. godine, i iznosio je 18 dana u Opekama, odnosno 16 dana u Brinjanima.

Dani s količinom oborina $\geq 50,0$ mm vrlo su rijetki na obje postaje. Godišnje se može očekivati najviše do dva takva dana, a pojavljuju se uglavnom u svibnju i lipnju te od kolovoza do studenog, i to po najviše jedan dan u mjesecu.

3.2. Proračun maksimalnih protoka vodotoka Jelenska

3.2.1. Definiranje maksimalnih protoka prema formuli prof. Srebrenovića

Maksimalne protoke se prema formuli prof. Srebrenovića [3] za mali sliv izračunavaju sljedećim izrazom:

$$Q_{\max p} = 0.48 \frac{\alpha_p}{(\beta\omega)\beta} \cdot F^{0,96} \cdot \psi_p \cdot S^{\frac{1}{3}}$$

gdje je:

$Q_{\max p}$ = maksimalna protoka (P-povratni period)

α_p = koeficijent maksimalnog otjecanja

β = faktor površinskog slijevanja (1-3), usvojeno 2,5

(prema procjeni sliv cca 70 % pošumljen)

$$\omega = 1 + \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

gdje je:

τ_1 = vrijeme površinskog skupljanja

τ_2 = vrijeme tečenja vodotokom

$$\psi_p = [H_s(1 + 1.5 \log P)]^{1.43}$$

gdje je:

H_s = godišnja oborina sliva (m)

P = povratni period (god.).

Obrada topografskih parametara izvršena je na karti mjerila 1:25000. Zbog oskudne mreže kišomjernih postaja, za čitav sliv Jelenske mjerodavna je kišomjerna stanica Kutina (149 m n.m.) s podacima za razdoblje od 1931. – 1960. Zbog usporedbe su dani podaci s mjernih postaja Opeke i Brinjani za razdoblje 1981. – 2005. bez 2002. Prosječne godišnje oborine na mjernoj postaji Opeke iznose 900,1 mm, a na mjernoj postaji Brinjani 828,2 mm. Prosječne godišnje oborine na mjernoj postaji Kutina za period 1931. – 1960. iznose 876 mm. Obzirom na prosječnu visinu sliva ($A_s=215$ m n.m.) godišnji se prosjek može popraviti gradijentom porasta od 75 mm na 100 mm, tj.

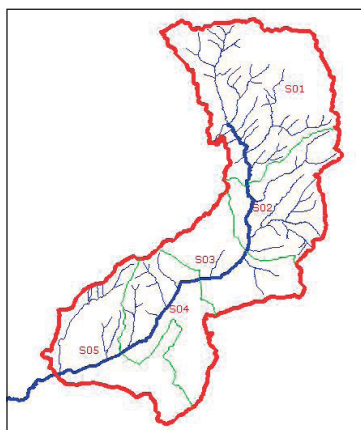
$(215-149) \cdot 0,75=50$ mm, odnosno prosječne godišnje oborine u slivu Jelenske iznose $H_s=876 + 50 = 926$ mm.

Uvođenjem svih poznatih veličina u formulu prof. Srebrenovića dobiva se maksimalna protoka i specifična protoka za analizirani sliv za 100 godišnji povratni period sa vrijednošću $Q_{max}=66,5$ m³/s, odnosno $q=1,86$ m³/s/km².

3.2.2. Proračun maksimalnih protoka SCS metodom

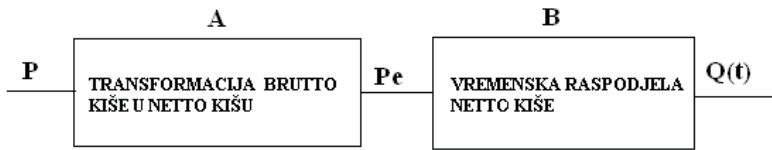
Na osnovu dostupnih mjerenih podataka određena je slivna površina i fizičko-geografski parametri, a na osnovu pedoloških podloga i podataka o zemljišnom pokrovu ostale karakteristike sliva potrebne za hidrološku analizu SCS metodom. Da bi se zadovoljio uvjet za primjenu SCS metode, sliv je podijeljen na pet podslivova površine do 15 km², kako je prikazano na Slici 9.

Za dobivanje optimalnog rješenja uređenja malih slivova potrebno je primijeniti sustavni pristup. Pri tome je pogodnije koristiti determinističke metode koje se temelje na utvrđivanju odnosa između uzročnih i posljedičnih procesa na osnovu relativno kratkih nizova podataka o istovremenim pojavama.



Slika 9. Položaj sliva i shema podslivova vodotoka Jelenska

Deterministički pristup hidrološkoj analizi može se prezentirati blok dijagramom (Slika 10):



Slika 10. Deterministički pristup hidrološkoj analizi

Metodološki pristup u određivanju hidrograma velikih voda svodi se na određivanje rada podsustava A i B. Za rješavanje podsustava A koristi se SCS metoda, dok se za rješavanje podsustava B koristi metoda Ven Te Chowa.

Za određivanje hidrograma velikih voda korištena je SCS metoda. Transformacija oborine u otjecanje predstavlja suštinu SCS metode, a definiranje maksimalnih protoka i hidrograma velike vode predstavlja realizaciju modela prilagođenog potrebama u praktičnome radu [4]. Metoda se koristi za male slivove, pa je pogodna za analizirani sliv vodotoka Jelenska.

Hidrolozi US Soil Conservation Service razvili su metodu proračuna direktnog (efektivnog) otjecanja kao funkciju kumulativnih oborina i raspoloživog podzemnog akumuliranja infiltriranih oborina. Metoda se temelji na poznatoj činjenici da za vrijeme dugotrajne kiše na malome slivu porastom vremena postoji tendencija da je kumulativno otjecanje jednako kumulativnoj oborini.

Razlika između kumulativne oborine P i otjecanja P_e u nekoj točki predstavlja višak oborine koja odlazi u podzemnu retenciju sliva ograničenog kapaciteta. Maksimalni kapacitet podzemne retencije označava se sa S . Ako se pretpostavi da ne postoji početni gubitak I_a (gubitak prije početka površinskog otjecanja), tada u svakom trenutku vrijedi relacija $(P - P_e)/S = P_e/P$, gdje lijeva strana predstavlja odnos stvarnog i maksimalnog kapaciteta retencije, a desna strana odnos između otekle i pale vode. Iz navedene relacije se dobiva:

$$P_e = \frac{P^2}{S + P}$$

Prema preporuci SCS metode ne zanemaruje se početni gubitak I_a , pa dobivamo izraz:

$$(P - I_a - P_e)/S = P_e/(P - I_a)$$

prema kojem je efektivna oborina:

$$P_e = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S)$$

U prethodnoj jednadžbi moraju se računati dva parametra: I_a i S . Hidraolozi US SCS su eksperimentalno, mjereći na nizu manjih slivova u SAD-u, utvrdili međusobnu ovisnost tih parametara: $I_a = 0,2S$. Stoga je potrebno poznavati maksimalni kapacitet retencije S . On nije konstantan, već ovisi o prethodnim uvjetima vlažnosti tla (prethodnim kišama) koji su klasificirani u tri razine: niska (I), srednja (II) i visoka (III).

U izrazu za efektivnu oborinu P_e pogodnije je koristiti izraz CN – broj krivulje otjecanja ili hidrološki kompleks pokrov – tlo, nego parameter S , a koji su u međusobnoj relaciji:

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \text{ ili } S = \frac{1000}{CN - 10}$$

Konačni oblik izraza za efektivnu oborinu glasi:

$$P_e = 25,4 \cdot \frac{\left(0,03937 \cdot P - \frac{200}{CN} + 2\right)^2}{0,03937 \cdot P + \frac{800}{CN} - 8}$$

gdje je:

P – kumulativna oborina u mm.

CN – broj krivulje otjecanja koji karakterizira sliv preko vrste vegetacijskog pokrova, tipa tla, tipa obrade tla i stanja prethodne vlažnosti tla.

Prema US SCS, tla su podijeljena na četiri tipa s obzirom na infiltracijske sposobnosti po prestanku oborina:

- Tip A: tla koja imaju visok stupanj infiltracije; duboka zemljišta pretežno sastavljena od pijeska s malo gline i ilovače te duboki i propusni les.
- Tip B: tla koja imaju umjerene infiltracijske sposobnosti; plića zemljišta, nešto kompaktniji les nego kod tipa A.
- Tip C: tla malih infiltracijskih sposobnosti; plitka tla s dosta gline i koloida.
- Tip D: tla malih infiltracijskih sposobnosti i velikog potencijalnog otjecanja, pretežno glinasta tla, vrlo plitka, nepropusni horizont nalazi se blizu površine.

Krivulje otjecanja korištene u ovoj analizi usvojene su prema knjizi 12/2 „Vodoprivredne osnove grada Zagreba, izmjene i dopune; 1992. godina” (IDVOGZ) [5].

Osnovni izraz za određivanje protoka za podsustav B prema metodi Van Te Chowa glasi:

$$Q_{\max} = F \cdot i \cdot y \cdot K \cdot 16,6 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

gdje je:

F – površina sliva u km^2

i – intenzitet neto oborine u mm/min

y – klimatski faktor, bezdimenzionalna veličina (za područje grada Zagreba usvaja se $y=1$)

K – faktor redukcije vrha vodnog vala.

Suštinu metode određuje faktor redukcije vrha vodnog vala:

$$K = \frac{Q_{jh}}{F}$$

gdje je:

Q_{jh} – protok vrha jediničnog hidrograma u $\text{m}^3\text{/s}$ po 1 mm efektivne oborine, izazvane efektivnom oborinom trajanja t .

Faktor redukcije vrha K je bezdimenzionalna veličina i predstavlja odnos protka vrha jediničnog hidrograma izazvanog kišom analiziranog trajanja t i otjecanja izazvanog istim kišnim intenzitetom beskonačnog trajanja.

Obzirom da za promatrani sliv nije izvedena analiza parametara K i tp , u okviru ove hidrološke analize su analogijom na osnovu fizičko – geografskih sličnosti između slivova usvojeni parametri prema [3].

Na osnovu topografskih podloga u mj 1:25 000 određeni su parametri fizičko-geografskih obilježja analiziranog sliva:

- površina podslivova,
- opseg podslivova,
- minimalna, srednja i maksimalna visina podslivova,
- hipsometrijske krivulje,
- položaji težišta slivova,
- udaljenost težišta od točke promatranja,
- koeficijent koncentriranosti sliva,
- dužina zamjenjujućeg pravokutnika,
- širina zamjenjujućeg pravokutnika,
- srednja apsolutna visina sliva,
- pad zamjenjujućeg pravokutnika te
- vrijeme prikupljanja sliva.

Fizičko–geografske karakteristike sliva su izračunate prema [1], a rezultati izračuna za slivove prema Slici 9 prikazani su u Tablici 5, dok je u Tablici 6

dana usporedba dobivenih rezultata proračuna maksimalnih protoka po formuli prof. Srebrenovića i po SCS metodi.

Tablica 5. *Fizičko–geografske karakteristike sliva vodotoka Jelenska*

Podsliv	F (km ²)	U (km)	A _{sr} (m n. m.)	A _{min} (m n. m.)	O (km)	ΔA (m)	K (l)	L (km)	S (‰)
S1	11.0	2.31	257.00	149.00	17.28	108.00	0.55	5.38	40.17
S2	6.3	1.56	220.50	140.00	12.45	80.50	0.65	3.62	44.45
S3	5.3	0.88	147.80	135.00	12.17	12.80	0.99	2.33	11.01
S4	6.2	1.49	138.60	124.00	14.75	14.60	0.56	3.97	7.35
S5	6.9	1.34	146.20	118.00	17.76	28.20	0.58	4.11	13.72

Tablica 6. *Iskaz maksimalnih protoka prema formuli prof. Srebrenovića i prema SCS metodi*

Povratni period	Maksimalna protoka (prema prof. Srebrenoviću)	Maksimalna protoka (prema SCS metodi)
P (god.)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
100	66,5	62,3

Da bi bili sigurni, u ovome je radu za potrebe dimenzioniranja korita i regulacije vodotoka Jelenska usvojena kao mjerodavna 100 godišnja maksimalna protoka dobivena prema formuli prof. Srebrenovića [7].

4. Rješenje regulacije vodotoka Jelenska

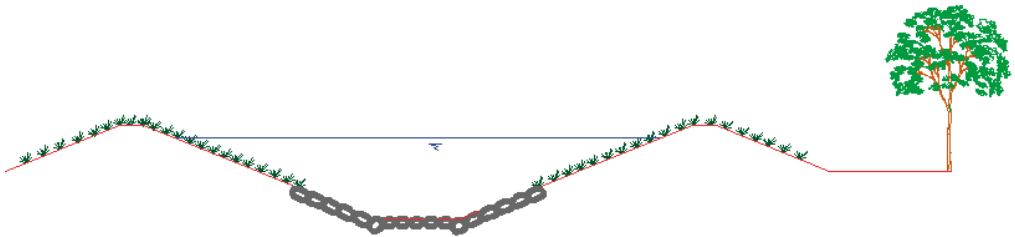
Zbog štetnog djelovanja voda na području općine Popovača i ugroženosti autoceste, predviđena je regulacija potoka Jelenska u dužini od cca 920 m. Za dimenzioniranje je korišten protok stogodišnjeg povratnog razdoblja koji iznosi $Q_{100}=66,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ovdje treba spomenuti da se prema dobivenim informacijama iz Hrvatskih voda maksimalne zabilježene vodne razine u retenciji Lonjsko polje na poziciji prijelaza ceste Sisak – Popovača kreću oko 97,0 m n.m. Budući da je potok Jelenska granica između katastarskih čestica različitih vlasnika, nastojalo se regulacijskom linijom što je više moguće pratiti postojeće stanje prirodnog korita.

Elementi trase vodotoka definirani su tako da se trasa najbolje uklopi u zatečeno stanje na terenu i zadovolje zahtjevi korisnika okolnog zemljišta. Veličine radijusa krivina kreću se od 10 do 513 m.

Zbog velike visinske razlike na projektiranoj dionici, linija nivelete je postavljena tako da se što više smanji pad te je u tu svrhu projektom predviđena izgradnja jednog slapišta na zadanoj dionici. Tok u kanalu je miran (Froudeov broj $F_R < 1$) i ne prelazi brzine veće od 1,63 m/s.

Stabilnost korita na bokovima osigurana je odgovarajućim nagibom obala te oblogom dna i bokova kamenim nabačajem (RIP-RAP) prema hidrauličkom proračunu, a nalazi se na sloju šljunka i filter folije. Za dno stepenica i slapišta predviđeno je da materijal bude beton koji se nalazi na šljunčanoj podlozi. Beton za izvedbu potpornih obalnih zidova te stepenica i slapišta je marke C 25/30. Za pregrade je također predviđena marka betona C 25/30.

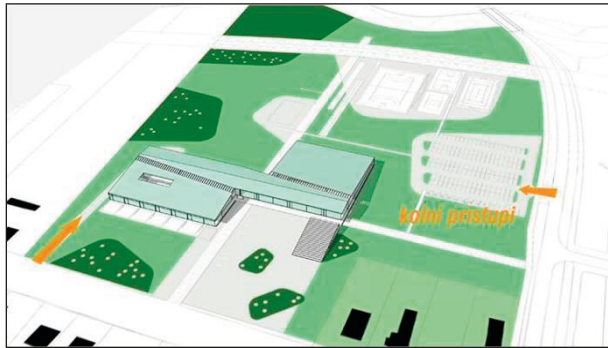
Hidrauličkim proračunom i dimenzijama korita određen je karakteristični trapezni profil. Proračunate dimenzije korita su 3,50 m*3,80 m. Nagib pokosa iznosi 1:2,5, a oblaganje pokosa korita na predviđenim mjestima izvodi se slaganjem lomljenog kamena (RIP-RAP) do visine 1,20 m, što je oko 10% visine za 100–godišnji povratni period (Slika 11).



Slika 11. Karakteristični presjek projektirane regulacije vodotoka Jelenska

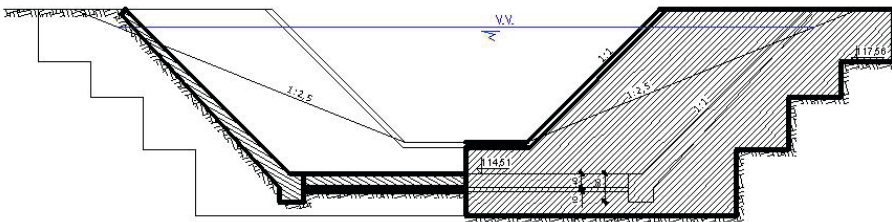
Projektna visina kanala ne može se osigurati samo iskopom, odnosno nije ekonomično vršiti samo iskop te se osiguravanje maksimalnog vodostaja rješava izradom nasipa na lijevoj i desnoj obali. Nasip se izvodi od zemljanog materijala iz pozajmišta u neposrednoj blizini, zbijanjem u slojevima do 20 cm. Nagib pokosa nasipa isti je kao i nagib pokosa kanala 1:2,5 te se tako nasip samo nastavlja na iskopani profil kanala. Širina krune nasipa iznosi 1,0 m, što je dovoljna širina u pogledu stabilnosti nasipa, a također ostavlja mogućnost kasnije izrade pješačke i/ili biciklističke staze u budućem parku – rekreacijskoj zoni, ukoliko se za to

ukaže potreba. Unutrašnju stranu nasipa potrebno je pomno zatravniti i redovito održavati kako bi pokos bio u stanju izdržati kratkotrajna djelovanja vode u slučaju velikih voda. Potrebno je obratiti pažnju i ne dopustiti sadnju drveća bilo koje vrste u profilu korita, na samome nasipu ili u blizini nasipa na udaljenosti manjoj od 10,0 m zato što korijenje razorno djeluje na stabilnost zemljanih nasipa (stvaranje pukotina i rupa u nasipu). Ova situacija je vrlo izgledna jer je u planu uređenje rekreacijske zone uz vodotok Jelensku i parka, pa je zbog toga potrebno obratiti pažnju na uređenje i održavanje dionice i nakon regulacije korita i završenih zemljanih radova i oblaganja korita (Slika 12) [7].



Slika 12. Projekt osnovne škole i uređenja sportsko – rekreacijske zone uz vodotok

Dno kanala obloženo je kamenim materijalom (RIP-RAP) određene veličine, dok su slapišta i stepenice izvedene kao armirano betonske konstrukcije na betonskoj podlozi debljine 0,15 m. Pregrade na preljevima treba izvoditi u jednostranoj oplati od betona C25/30 s ugrađenom potrebnom armaturom. Krila preljeva ulaze u teren minimalno 1,0 m kako bi bila zaštićena od smrzavanja (Slika 13).



Slika 13. Slika 13: Poprečni presjek projektirane pregrade

Predviđeno je oblaganje korita kamenometom zato što granični naponi vučne sile prelaze dopuštene vrijednosti za zemljano korito. Drugi razlog je

taj što je na prostoru sajmišta predviđena izgradnja sportskog parka. Korito obloženo kamenom može se lijepo estetski uklopiti u sportski park, a zajedno s pratećim mostićima (lučni, viseći ili rešetkasti) i pravilnim izborom drveća uz korito radi hlada park ne treba razdvajati, nego će sve činiti jedinstvenu cjelinu.

S aspekta sigurnosti korita svakako ne treba opravdavati osiguranje korita, tim više što sračunate vučne sile prelaze dopuštena naprezanja. Pokose iznad obloge treba pomno zatravniti jer travnati pokrov pod kratkim djelovanjem vode može izdržati granično naprezanje od 300 kPa. Dakle, radi skupoće izvedbe obloge u punom profilu, pokose iznad 1,20 m visine ostavljamo neobložene time da se nakon izvedbe zatravne, pomno održavaju i da se pravodobno reagira adekvatnim radovima ukoliko dođe do većih oštećenja.

Na projektnoj dionici na stacionaži 0+261,08 km nalazi se jedan cestovni most i uz njega pješački most (Slika 14) koji svojim stanjem osiguravaju optimalne uvjete korištenja za sadašnje potrebe korisnika. Pješački most je izveden 2009. godine i dimenzijama odgovara maksimalnom projektiranom vodostaju 100-godišnje vode. Donji rub konstrukcije pješačkog mosta nalazi se na 119,20 m n.m., što osigurava nadvišenje od približno 50 cm iznad mjerodavne 100 godišnje vode.

Cestovni most također zadovoljava jer se donji rub konstrukcije nalazi na 119,54 mn.m., što je 0,75 m više od projektiranog vodostaja 100-godišnje vode. Kako je maksimalni protok dobiven proračunom prema formuli prof. Srebrenovića koja već u sebi sadrži određene koeficijente sigurnosti, sigurno neće doći do prelijevanja mosta i ugrožavanja prometa.



Slika 14. Izgrađeni cestovni i pješački most preko vodotoka Jelenska

U budućnosti se planira izgradnja još barem jednog pješačkog mosta koji će povezivati lijevu i desnu obalu potoka Jelenske. Pozicija i dimenzije mosta bit će definirane prema uređenju sportskog parka i potrebama korisnika [7].

5. Zaključak

Na području općine Popovača, zbog ugroženosti autoceste i okolnih naselja poplavama, predviđena je regulacija vodotoka Jelenska u dužini od cca 920 m. Za dimenzioniranje je korišten protok stogodišnjeg povratnog razdoblja koji je proračunat na iznos $Q_{100}=66,00 \text{ m}^3/\text{s}$. Elementi trase vodotoka definirani su tako da se ista najbolje uklopi u zatečeno stanje na terenu i zadovolje zahtjevi korisnika okolnog zemljišta. Stabilnost korita na bokovima osigurana je odgovarajućim nagibom obala te oblogom dna i bokova kamenim materijalom na sloju šljunka i filter folije.

Korito obloženo kamenom može se lijepo estetski uklopiti u sportski park, a zajedno s pratećim mostićima (lučni, viseći ili rešetkasti) i pravilnim izborom drveća uz korito radi hlada, park ne treba razdvajati, nego će sve činiti jedinstvenu cjelinu. Kako je maksimalni protok dobiven proračunom prema formuli prof. Srebrenovića koja već u sebi sadrži određene koeficijente sigurnosti, izgradnjom projektirane regulacije neće doći do prelijevanja mosta i izljevanja vode iz korita te ugrožavanja prometa i drugih dobara.

Osim osnovnog cilja zaštite od poplava, predviđeno rješenje predstavlja i doprinos krajobrazu gdje se u budućnosti planira izgradnja još jednog pješačkog mosta kao i uređenje sportskog parka u skladu s potrebama korisnika.

6. Literatura

- [1] Grubešić, M.: *Dabar u Hrvatskoj*, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2008.
- [2] Vodoprivredno – projektni biro d.d. Zagreb: *Zaštita nizinskog područja zapadnog dijela Kazete-8 (i autoceste) od brdskih voda*, Zagreb 2002.
- [3] Srebrenović, D.: *Problemi velikih voda*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1970.
- [4] Ožanić, N.: *Hidrotehničke regulacije – interna skripta*, Građevinski fakultet, Rijeka, 2002.
- [5] Hrvatske vode: *Vodoprivredne osnove grada Zagreba, izmjene i dopune; svezak 12/2*; Zagreb, 1992.
- [6] Mišćević, M.: *Regulacija korita vodotoka Jelenska*, Građevinski fakultet Rijeka, Diplomski rad, Rijeka, 2010.
- [7] Vodoprivredno – projektni biro d.d. Zagreb: *Akumulacija Polojac – Studija o utjecaju na okoliš*, Zagreb, 2008.

ODREĐIVANJE PARAMETARA ČVRSTOĆE PIJESKA U PRIJENOSNOM UREĐAJU ZA IZRAVNI POSMIK

DETERMINATION OF SAND STRENGTH PARAMETER IN PORTABLE DIRECT SHEAR APPARATUS

Vedran Jagodnik, Kristijan Ljutić

Sažetak. U geotehničkom inženjerstvu parametri čvrstoće tla definirani su preko kohezije i kuta unutrašnjeg trenja. Poznavajući parametre čvrstoće moguće je odrediti ponašanje tla primjenom Mohr – Coulombovog kriterija čvrstoće, koji, iako idealiziran, ima veliku uporabu u praksi zbog svoje jednostavnosti.

U sklopu članka prikazat će se određivanje parametara čvrstoće primjenom prijenosnog uređaja za izravni posmik na pijescima nastalim riječnim depozitom. Uz prethodno definirani geološki postanak materijala, prikazat će se dvije vrste pokusa: pokus s konstantnim vertikalnim naprežanjem i pokus uz konstantnu visinu uzorka. Za svaki od navedena dva pokusa provest će se tri serije ispitivanja uzorka za različite vrijednosti početnog vertikalnog naprežanja. Kao rezultat prikazat će se Mohr – Coulombov kriterij čvrstoće ispitanog materijala.

Ključne riječi: parametri čvrstoće, Mohr – Coulombov kriterij, prijenosni uređaj za izravni posmik, konstantno vertikalno naprežanje, konstantna visina uzorka

Abstract. In geotechnical engineering, soil strength parameters are defined by cohesion and friction angle. Knowing soil strength parameters, soil behaviour can be defined by the Mohr - Coulomb strength criterion which, although idealized, has great practical application due to its simplicity.

This paper presents soil strength parameter determination by using portable direct shear apparatus on sands made by river deposits. Two types of tests with previously defined geological genesis will be presented: the test with the

constant vertical stress and the test with the constant height. For each of the two mentioned types of test, three series of tests will be performed for different initial vertical stress. As a result Mohr - Coulomb strength criterion will be presented for the tested material.

Key words: *soil strength parameters, Mohr – Coulomb criterion, portable direct shear apparatus, constant vertical stress, constant height*

1. Uvod

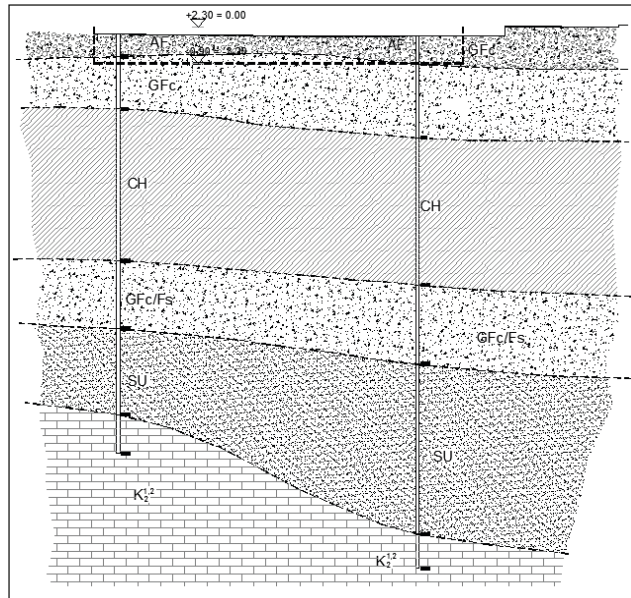
U geotehničkom inženjerstvu prilikom proračunavanja nosivosti temelja, pilota, stabilnost potpornih zidova i zagatnih stijena te stabilnosti kosina značajnu ulogu imaju parametri čvrstoće tla. Dva najosnovnija parametra čvrstoće tla su kohezija i unutarnji kut trenja. Poznavanjem ta dva parametra moguće je definirati Mohr – Coulombov kriterij čvrstoće koji, iako idealiziran, ima široku primjenu u praksi zbog jednostavnosti primjene.

Parametri čvrstoće određuju se laboratorijskim ispitivanjem, i to korištenjem triaksijalnog uređaja ili uređaja za izravan posmik. U ovom radu prikazat će se određivanje parametara čvrstoće sa prijenosnim uređajem za izravni posmik. Prijenosni uređaj za izravni posmik proizvela je tvrtka Marui & Co., a doniran je Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u sklopu Hrvatsko – Japanskog projekta za identifikaciju rizika i korištenje zemljišta i monitoringa klizišta (Croatia – Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia). Uređaj je slabo poznat u Europi te postoji vrlo malo radova u kojima se spominje. Razvijen je za ispitivanje parametara čvrstoće plitkih klizišta [1, 2, 3].

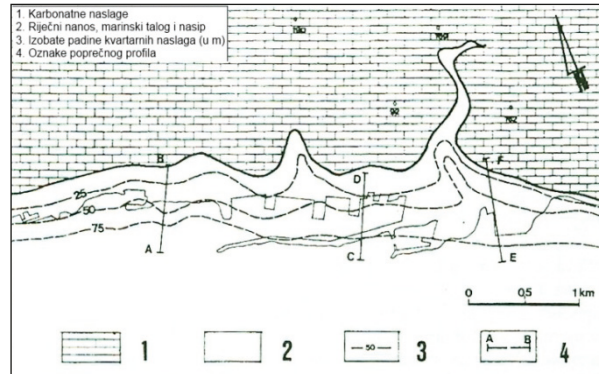
Unutar rada prikazat će se rezultati dobiveni ispitivanjem pijesaka u uređaju za izravni posmik, i to u dvije serije ispitivanja za tri različita početna vertikalna naprezanja. Prva serija rezultata ispitivanja provedena je s konstantnim vertikalnim naprezanjem, a druga serija rezultata s konstantnom visinom uzorka. Na kraju su dani zaključci doneseni na temelju rezultata i prijedlozi za poboljšanje uređaja.

2. Lokacija materijala ispitivanja

Lokacija na kojoj su izvedeni istražni radovi i izvađen uzorak tla nalazi se na estuariju ušća Rječine nastalom nasipavanjem materijala nakon 1550. god. [4]. Razina tla nalazi se na 2,3 m iznad razine vode. Na tom području provedena su geotehnička istraživanja kako bi se formirao geotehnički profil lokacije. Geotehnički profil sastoji se od pokrivača i vapnenačke podloge. Debljina stijenske podloge varira od 35 do 50 m. Pokrivač se sastoji od nasipa te sedimenata praha, gline i pijeska, što se može vidjeti na Slici 1.



Slika 1. Inženjersko geološki profil lokacije [5]



Slika 2. Geološka građa priobalnog područja grada Rijeke [6]

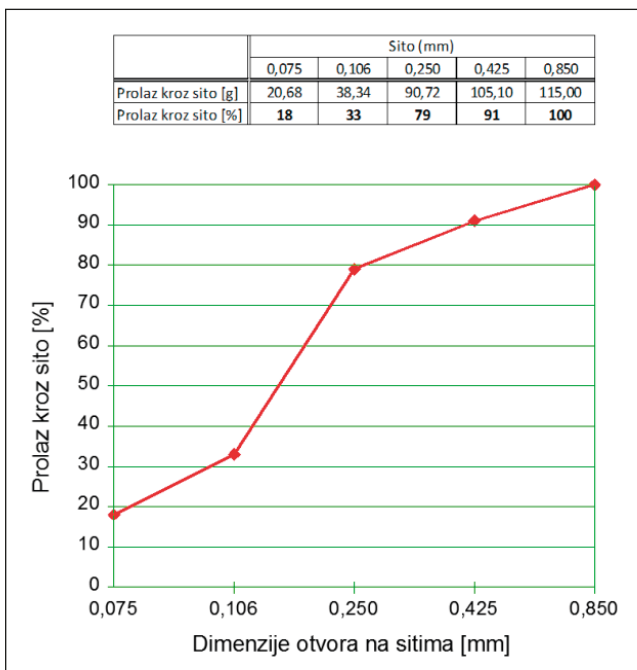
Glinoviti slojevi imaju visoku plastičnost, dok su slojevi pijeska jednolično graduirani [6]. Shematski prikaz geološke građe ušća Rječine može se vidjeti na Slici 2 koja jasno prikazuje riječne nanose, marinski talog i nasip. Prema tome, može se zaključiti da lokacija uz ušće Rječine nije nimalo „bezazlena“ i da je potrebno dobro poznavanje ponašanja tla. Prema inženjersko – geološkom profilu, sloj pijeska se nalazi na dubini od oko 25 – 27 m. Debljina sloja pijeska koji će unutar ovog rada biti ispitan kreće se od 8 – 15 m s pravcem pružanja jug - sjever [4].

3. Granulometrijski sastav uzorka

Uzorak za ispitivanje bio je u vezanom, ali u potpuno suhom stanju te ga je bilo potrebno razmrviti i usitniti prije prosijavanja. Usitnjavanje je obavljeno ručno sa mužarom u posudi. Za ispitivanje predviđeni dio uzorka ukupne mase 2014,80 g prosijan je kroz sito dimenzije otvora 0,850 mm, čime se dobiva uzorak srednjih (sa malim udjelom krupnih) i sitnih pijesaka mase 1682,28 g, gustoće 1519,05 kg/m³.

Granulometrijski sastav uzorka određen je na osnovu prosijavanja kroz seriju sita dimenzija otvora 0,850 mm, 0,425 mm, 0,250 mm, 0,106 mm i 0,075 mm. Prosijavanje se vršilo na reprezentativnom uzorku mase 115 grama dobivenom četvrtanjem [7].

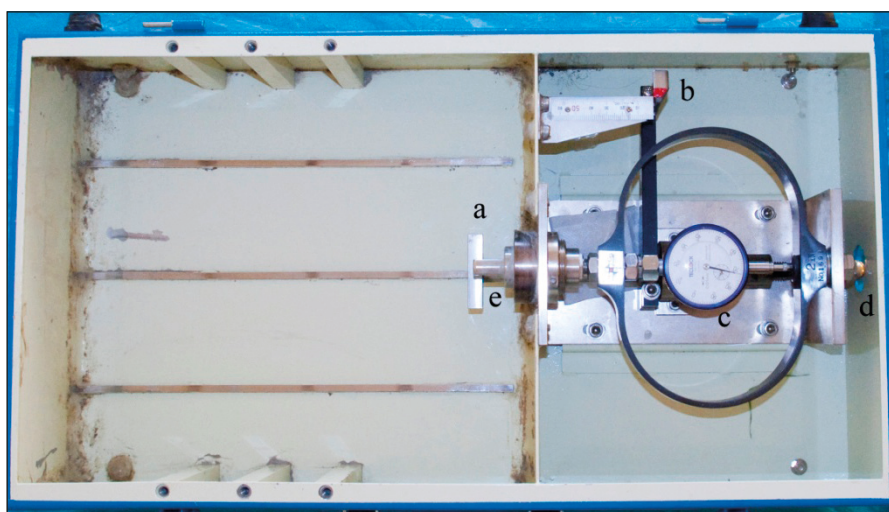
Ovako dobivena granulometrijska krivulja nije potpuna. Zbog nemogućnosti laboratorijskih ispitivanja provedena su samo ispitivanja prosijavanjem. Za potpunu granulometrijsku krivulju potrebno je provesti areometriranje.



Slika 3. Granulometrijska krivulja uzorka [8]

4. Prijenosni uređaj za izravni posmik

Prijenosni uređaj za izravni posmik doniran je Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u sklopu Hrvatsko – Japanskog projekta za identifikaciju rizika i korištenje zemljišta i monitoringa klizišta (Croatia – Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia). Uređaj se sastoji od dva osnovna dijela: prijenosni dio za opterećenje uzorka na posmično naprezanje (u daljnjem tekstu t) (Slika 4) i prijenosni dio za opterećenje uzorka na vertikalno naprezanje (u daljnjem tekstu s_v) (Slika 5). Donji dio uređaja prikazan Slikom 4 sastoji se od: a) dijela uređaja za guranje donjeg dijela okvira uzorka, b) mjerka za očitavanje inkrementa pomaka, c) mjerne urice za očitavanje posmične sile, d) vijka za dodavanje posmične sile i e) otvora za osiguranje gornjeg dijela okvira uzorka. Gornji dio uređaja (Slika 5) sastoji se od: a) ručice za dodavanje vertikalne sile, b) mjerne urice za očitavanje vertikalnog naprezanja, c) mjerne urice za očitavanje vertikalnog pomaka i d) ploče za prenošenje opterećenja na uzorak.



Slika 4. Donji dio prijenosnog uređaja za izravni posmik

Uređaj je razvijen za ispitivanje parametara čvrstoće na terenu, i to kod plitkih klizišta kakva se događaju u Japanu [1, 2, 3]. Uređaj je lagan i ne iziskuje puno napora za transport [2]. Okvir uređaja za izravni posmik omogućuje uzimanje neporemećenih uzoraka s terena. Uzorci se mogu uzeti s malih dubina, čime je ujedno i definiran bitni nedostatak ovog uređaja. Zbog dimenzija okvira (20 x 20 x 10 cm) i graničnog opterećenja za posmičnu i normalnu silu od 2 kN, maksimalna naprezanja koja se mogu dobiti uređajem

su oko 50 kPa što omogućuje ispitivanje uzoraka za male dubine [3]. Kao jedna od mogućnosti povećanja vertikalnih, a i posmičnih naprezanja, predlaže se primjena manjeg okvira, dimenzija 10 x 10 x 10 cm, čime bi se moglo doseći naprezanja do 200 kPa.



Slika 5. Gornji dio prijenosnog uređaja za izravni posmik

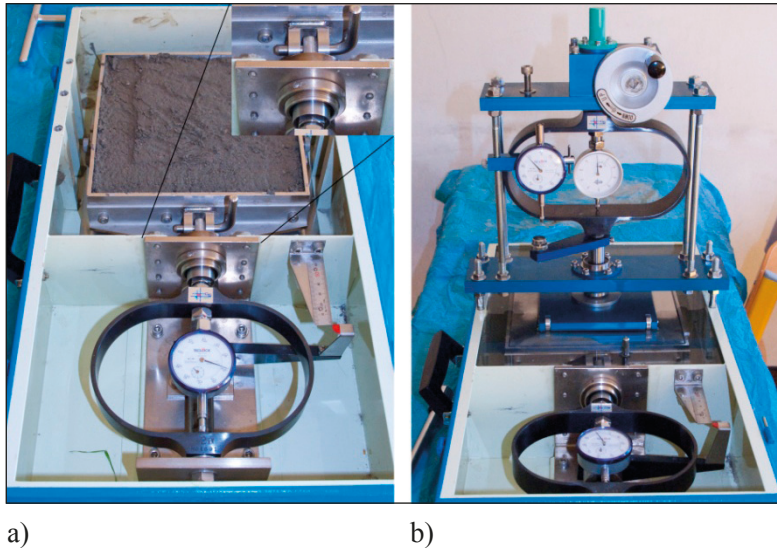
Iako je namjenjen za male dubine, uređaj se može koristiti za definiranje početnih vrijednosti parametara čvrstoće s kojima se ulazi u numeričke analize radi uvida u ponašanje materijala. Na Slici 6 prikazani su dijelovi uređaja za izravni posmik: okvir uređaja načinjen od visokovrijednog nehrđajućeg čelika koji se bez većih problema može pobijati u raspadnute meke stijene (kao što je raspadnuti fliš), a) nosači, b) vijci za pričvršćivanje gornjeg dijela uređaja za donji dio, c) “kopča” za fiksiranje gornjeg dijela okvira za uređaj za izravni posmik, d) okvir za smicanje, e) donja, podložna ploča, f) gornja ploča za opterećivanje i g) ručica za dodavanje posmičnog pomaka. Ukoliko se ispituje materijal kao što je pijesak, tada se u laboratoriju vrši izravno ugrađivanje u okvir. Pijesak, čiji su rezultati ispitivanja prikazani ovim radom, ugrađen je u okvir uređaja prethodnim mrvljenjem i usitnjavanjem kako bi se poništila cementacija nastala isušivanjem materijala tijekom njegovog skladištenja. Slikom 7 prikazan je ugrađeni uzorak u okvir uređaja za izravni posmik smješten u dio za dodavanje posmičnog pomaka. Gornji dio okvira učvršćen je “kopčom” prikazanom na Slici 6e) za pregradu segmenta za dodavanje

pomaka, što je vidljivo na detalju Slike 7a). Vijci prikazani Slikom 6 učvrste se na rupe u dijelu uređaja za posmičnu silu te se na njih postavlja drugi, gornji dio uređaja kojim se dodaje vertikalna sila koja uzrokuje vertikalna naprezanja (s_v) u uzorku. Izgled uređaja pripremljenog za ispitivanje prikazan je na Slici 7b).

Nakon ugradnje uzorka i njegovog potapanja u vodi, uzorci se konsolidiraju te se pristupa ispitivanjima koja će biti pojašnjena u sljedećem poglavlju.



Slika 6. Djelovi okvira uređaja za izravni posmik



Slika 7. a) Uzorak pijeska ugrađen u donji okvir uređaja, b) Pripremljeni uzorak za ispitivanje u uređaju za izravni posmik

5. Ispitivanje pijesaka

Provedene su dvije vrste ispitivanja: ispitivanje uz konstantno vertikalno naprezanje i ispitivanje uz konstantnu visinu uzorka. Unutar ovog poglavlja opisan je način ispitivanja. Pijesci su ispitivani za tri različita vertikalna naprezanja, 5, 10 i 20 kPa.

Svaki uzorak prije ispitivanja konsolidiran je na vrijednost normalnog naprezanja (5, 10 ili 20 kPa) za koje se provodilo ispitivanje. Vertikalno naprezanje se dodavalo postepeno, u intervalima od 0.5 kPa. Na sljedeći interval opterećenja krenulo se tek kada se mjerna urica za očitavanje vertikalnog naprezanja (Slika 5b) umirila na trenutnom intervalu naprezanja. Vrijeme konsolidacije nije bilježeno, kao ni vrijeme između intervala. Način konsolidiranja bio je isti za sve vrste pokusa.

Pokus uz konstantno vertikalno naprezanje jedan je od karakterističnih pokusa kod uređaja za izravni posmik. Prilikom ispitivanja mjeri se vertikalni pomak i posmično naprezanje. Prije početka ispitivanja potrebno je definirati pomak za koji će se pomicati donji dio okvira za izravni posmik. Za pomak je odabrano 0,5 mm bez obzira o kojim se vertikalnim naprezanjima radilo. Kod vertikalnog naprezanja od 5 kPa bilježile su se promjene vertikalnog pomaka i posmičnog naprezanja za svakih 0,5 mm, dok su se kod naprezanja od 10 kPa i 20 kPa bilježili pomaci i naprezanja pri pomaku od 1 mm. Rezultati ispitivanja prikazani su u poglavlju 5.1.1.

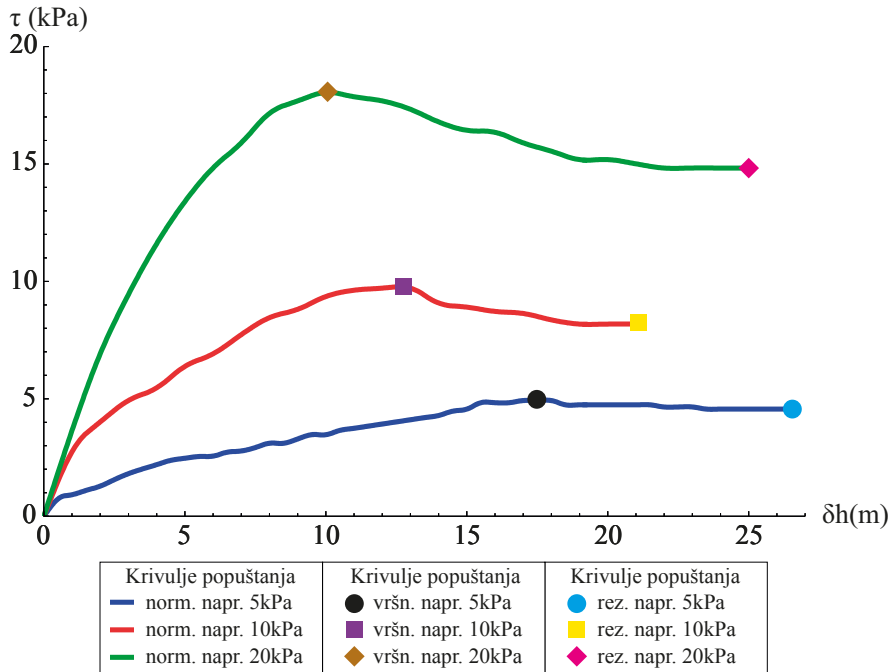
Pokus uz konstantnu visinu uzorka nije jedan od karakterističnih pokusa, no može dati uvid u ponašanje materijala kada mu je pomak iz nekih razloga spriječen. Prilikom ovog ispitivanja visina uzorka održavala se konstantnom dok su se bilježile promjene posmičnog i vertikalnog naprezanja za zadani pomak. Kao i kod prethodno spomenutog pokusa, zadani posmični pomak bio je 0,5 mm te se za početno vertikalno naprezanje od 5 kPa bilježilo vertikalno i posmično naprezanje za svakih 0,5 mm, dok se kod većih naprezanja bilježila promjena svakih 1 mm. Rezultati ispitivanja prikazani su u poglavlju 5.1.2.

5.1. Rezultati ispitivanja

U sklopu ovog poglavlja prikazat će se suodnosi naprezanja i deformacija, vršna i rezidualna naprezanja na temelju kojih su se odredili vršni rezidualni parametri čvrstoće.

5.1.1. Rezultati ispitivanja pijesaka pri konstantnom vertikalnom naprezanju

Na Slici 8 prikazan je dijagram posmičnog naprezanja i posmičnog pomaka za pokuse od 5, 10 i 20 kPa pri konstantnom vertikalnom naprezanju.



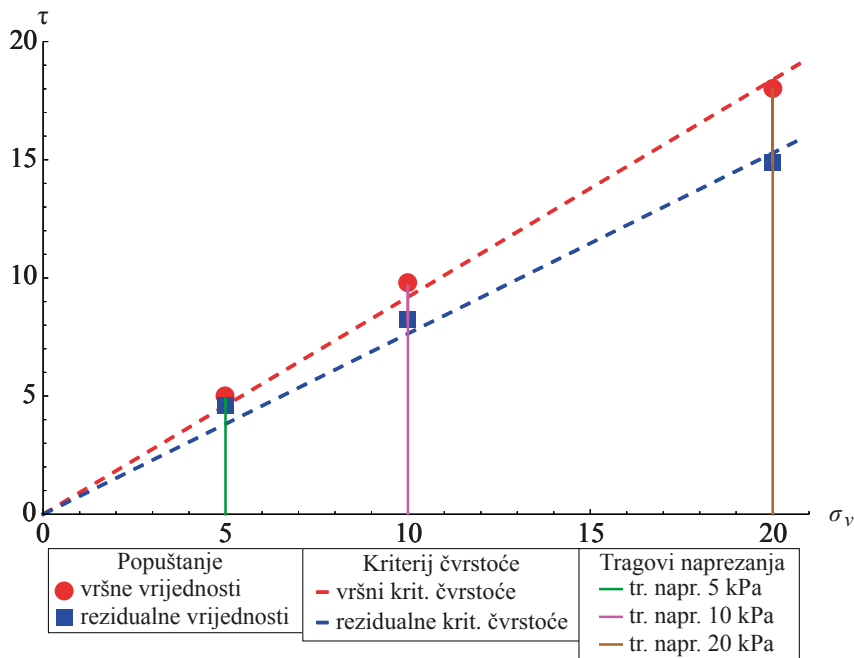
Slika 8. Krivulje posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka za pokuse pri konstantnom vertikalnom naprezanju

Na Slici 9 vidi se da s povećanjem vertikalnog napreznja raste i posmično napreznje. Tablicom 1 prikazane su vrijednosti vršnih i rezidualnih napreznja dobivenih za ovaj tip pokusa.

Tablica 1. Vršna i rezidualna napreznja za pokus s konstantnim vertikalnim napreznjem

Vršna napreznja		Rezidualna napreznja	
σ_v [kPa]	τ [kPa]	σ_v [kPa]	τ [kPa]
5	● 4.92	5	● 4.56
10	■ 9.71	10	■ 8.18
20	◆ 18.04	20	◆ 14.82

Na Slici 9 prikazani su tragovi napreznja za navedene pokuse s naznačenim vršnim i rezidualnim napreznjima ($t - s_v$ ravnina). U poglavlju 5.2 prikazat će se proračun parametara čvrstoće na temelju linearne regresije. Na Slici 9 ujedno su prikazani i regresijski pravci. Navedeni regresijski pravci ujedno predstavljaju kriterij čvrstoće.



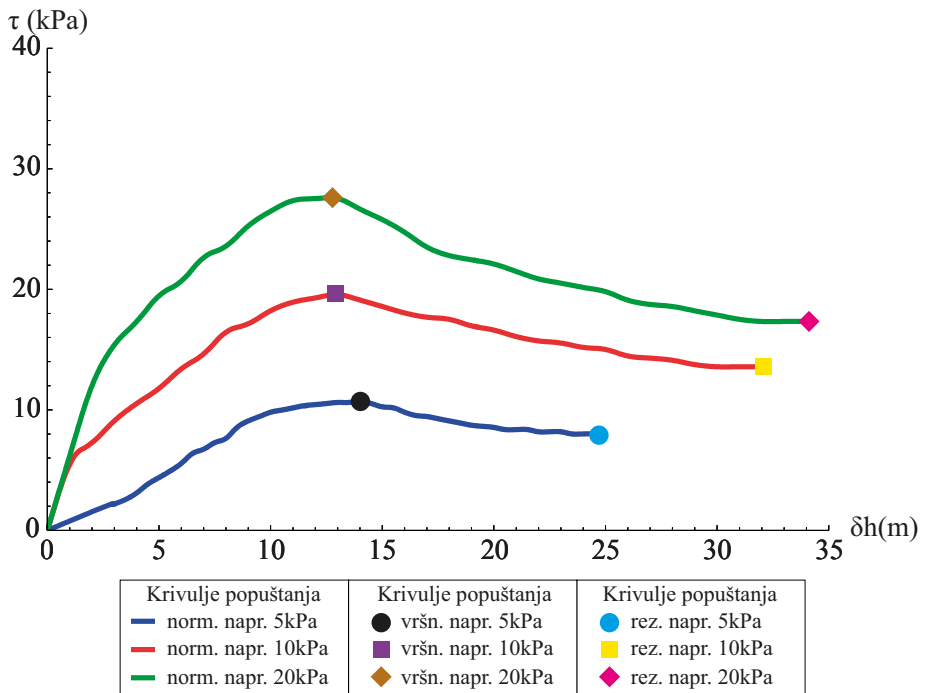
Slika 9. Tragovi napreznja s vršnim i rezidualnim kriterijem čvrstoće te naznačenim vrijednostima vršnih i rezidualnih napreznja za pokus s konstantnim vertikalnim napreznjem

5.1.2. Rezultati ispitivanja pijesaka uz konstantnu visinu uzorka

Na Slici 10 prikazan je dijagram posmičnog napreznja i posmičnog pomaka za pokuse od 5, 10 i 20 kPa pri konstantnoj visini uzorka.

Tablicom 2 dane su vrijednosti vršnih i rezidualnih napreznja za ovaj tip pokusa.

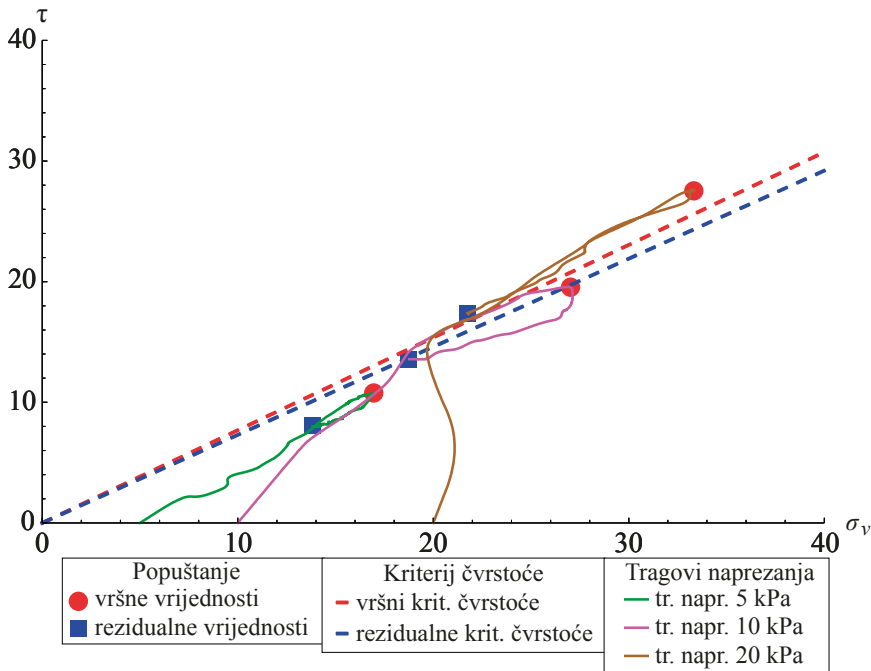
Na Slici 11 prikazani su tragovi napreznja za navedene pokuse sa naznačenim vršnim i rezidualnim napreznjima ($t - s_v$ ravnina). Na temelju tragova napreznja prikazanih na Slici 11 može se uočiti da se oni približavaju liniji kriterija čvrstoće kako se uzorak približava vršnoj čvrstoći. Oblik tragova napreznja karakterističan je za srednje-zbijene do zbijene zrnaste materijale [9].



Slika 10. Krivulje posmičnog napreženja i horizontalnog pomaka za pokuse pri konstantnoj visini uzorka

Tablica 2. Vršna i rezidualna napreženja za pokus s konstantnom visinom uzorka

Vršna napreženja		Rezidualna napreženja	
σ_v [kPa]	τ [kPa]	σ_v [kPa]	τ [kPa]
16,854	● 10,7013	13,8258	● 7,999753
26,918	■ 19,5531	18,7633	■ 13,57217
33,140	◆ 27,5274	21,7605	◆ 17,33005



Slika 11. Tragovi naprezanja s vršnim i rezidualnim kriterijem čvrstoće te naznačenim vrijednostima vršnih i rezidualnih naprezanja za pokus s konstantnom visinom uzorka

5.2. Proračun parametara čvrstoće

Kako bi se odredili parametri čvrstoće na temelju prikazanih rezultata, primjenit će se jednačba linearne regresije [10], (1):

$$y - \bar{y} = k \cdot (x - \bar{x}) \quad (1)$$

gdje je:

\bar{x} – aritmetička sredina varijabli na x osi

\bar{y} – aritmetička sredina varijabli na y osi

k – koeficijent smjera pravca (ujedno i koeficijent regresije).

Koeficijent smjera k , dobije se primjenom (2):

$$k = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot (n-1) \cdot s_x^2} \quad (2)$$

gdje je:

n – broj točaka regresije.

Varijabla s_x^2 u nazivniku (2) može se odrediti na temelju (3):

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_j \right)^2 \right] \quad (3)$$

Tablicom 3 prikazane su vrijednosti parametara čvrstoće, vršnih i rezidualnih, za obje vrste ispitivanja.

Tablica 3. Vrijednosti kriterija čvrstoće za pokus s konstantnim vertikalnim naprežanjem i konstantnom visinom uzorka

Oblik čvrstoće/ parametar čvrstoće	Konstantno vertikalno naprežanje		Konstantna visina uzorka	
	Kohezija [kPa]	Kut trenja [°]	Kohezija [kPa]	Kut trenja [°]
Vršna čvrstoća	0.	42.57	0.	37.54
Rezidualna čvrstoća	0.	37.38	0.	36.14

Rezultati i ponašanje uzorka u skladu su s rezultatima iz nekih prethodnih ispitivanja pijesaka [9]. Na Slici 9 tragovi naprežanja su vertikalni zbog vrste ispitivanja uzorka (ispitivanje sa konstantnim vertikalnim naprežanjem s_v). Pravci kriterija čvrstoće dovoljno dobro koreliraju s vršnim vrijednostima. Na Slici 11 jasno se može uočiti da se trag naprežanja za pokus uz konstantnu visinu postepeno približava kriteriju čvrstoće. U Tablici 3 prikazane su vrijednosti parametara čvrstoće.

6. Zaključak

Određivanje parametara čvrstoće tla bitna je stavka u određivanju ponašanja tla, proračunu nosivosti građevnih konstrukcija i modeliranja ponašanja tla. U sklopu ovog članka prikazane su dvije vrste ispitivanja na temelju kojih se mogu dobiti parametri čvrstoće, kut trenja i kohezija, ispitivanje s konstantnim vertikalnim naprežanjem i ispitivanje s konstantnom visinom uzorka. Poznavajući navedena dva parametra moguće je definirati kriterij čvrstoće po kojemu će se materijal ponašati. Također, uz prethodno poznavanje elastičnih konstanti poput modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta, moguće je u

sklopu numeričkih analiza pretpostaviti idealno plastično ponašanje materijala, koji, iako idealiziran, može dati uvid u ponašanje tla i konstrukcije te ga se može koristiti u početnim parametarskim analizama.

Unutar poglavlja 4 navedene su njegove prednosti i mane, no autori izdvajaju neke najbitnije. Osnovna prednost uređaja je što je prijenosan i lagan, ne iziskuje puno napora u transportu niti u uzimanju neporemećenog uzorka s lokacije ispitivanja. Nedostaci su uglavnom vezani za veličinu okvira. Obzirom da se radi o velikom okviru (20 x 20 x 10 cm), uz ograničenu vrijednost vertikalnog i posmičnog opterećenja od 2 kN, maksimalno naprezanje koje se može ostvariti je oko 50 kPa, što u grubo odgovara dubinama između 2 i 3 m. Prema tome, može se zaključiti da je navedeni uređaj namjenjen za ispitivanje stanja materijala relativno blizu površine (posmična čvrstoća materijala za određivanje stabilnosti plitkih klizišta). Predlaže se korištenje okvira dimenzija 10 x 10 x 10 cm čime bi se moglo postići vrijednosti naprezanja maksimalno 200 kPa, što bi odgovaralo dubinama od 9 do 11 m. Uz smanjenje okvira predlaže se zamjena analognih mjernih urica uređaja (Slika 4 c) i Slika 5 b)) s digitalnim LVDT uređajima koji omogućavaju automatsko bilježenje rezultata na računalo čime se umanjuje greška prilikom upisivanja očitanih vrijednosti.

Rezultati i ponašanje uzorka u skladu su s rezultatima iz nekih prethodnih ispitivanja pijesaka [9]. Vršne vrijednosti parametara čvrstoće karakteristične su za ispitani materijal. Na Slici 9 tragovi naprezanja su vertikalni zbog vrste ispitivanja uzorka (ispitivanje sa konstantnim vertikalnim naprežanjem s_v). Pravci kriterija čvrstoće dovoljno dobro koreliraju s vršnim vrijednostima. Na Slici 11 jasno se može uočiti da se trag naprezanja za pokus uz konstantnu visinu uzorka postepeno približava kriteriju čvrstoće, što je karakteristično za zrnate materijale. U Tablici 3 prikazane su vrijednosti parametara čvrstoće.

Zahvala. *Zahvaljujemo se Japanskoj međunarodnoj agenciji za suradnju, JICA, za donaciju prijenosnog uređaja za izravan posmik u sklopu Hrvatsko-Japanskog Projekta identifikacije rizika i planiranja korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj.*

7. Literatura

- [1] K. Sassa. The Mechanism to initiate debris flows as undrained shear of loose sediments. International Symposium, Interpraevent. Villach, Austrija, 73-87, 1984
- [2] M. Kaibori, K. Sassa. A portable Field Direct Shear Apparatus – Some test results and comparison with conventional shear tests. International Symposium. Villach, 263-274, 1984 (na njemačkom)

- [3] K. Sassa. *Osobna komunikacija*, 2011
- [4] Ž. Arbanas, V. Jagodnik, M. Grošić, D. Goršić. Foundation of new buildings in old urban areas. U: M.J. Brown, M.F. Bransby, A.J. Brennan, J.A. Knappett, *Proceedings of 2nd BGA International Foundation Conference (ICOF 2008)*, 975-984, Balkema, Dundee, Scotland, 2008.
- [5] V. Jagodnik. Analiza naprezanja i deformacija stambeno – poslovnog objekta Stari Grad. *Diplomski rad*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2007
- [6] Ž. Arbanas, Č. Benac, B. Jardas. Geotničke značajke priobalnog područja grada Rijeke. *Pomorski zbornik*, 32: 467-480, 1984
- [7] ASTM D421 - 85. Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, 2007
- [8] V. Jagodnik, K. Ljutić. Ispitivanje pijesaka. *Seminarski rad*, Teorijska mehanika tla, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2010.
- [9] D.M.Wood. *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Text, Cambridge, 1990.
- [10] E. Kreyszig. *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley & Sons, Inc., Singapore, 2006.

PRIMJENA EPS GEOPJENE U GEOTEHNIČKOM INŽENJERSTVU

APPLIANCE OF EPS GEOFOAM IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

Katja Ćuk*, Leo Matešić**

***Sažetak.** Već dugi niz godina u građevinarstvu je prisutna primjena geopjene, prvenstveno u izgradnji nasipa u slučajevima kada se želi što više smanjiti ili u potpunosti isključiti slijeganje. Osnovno načelo rješenja je u tome da se izrazito laganim, dovoljno krutim i čvrstim materijalom izgradi nasip koji u konačnici neće prouzročiti dodatna naprezanja u tlu. Rad pruža pregled bitnih svojstava i načela od proizvodnje do ugradnje geopjene koja su bitna za projektiranje i izvođenje. Pored prikaza izvedenih projekta u radu se daje i prijedlog primjene kod slabonosivog tla. Rad pruža smjernice za širu primjenu geopjene u građevinarstvu.*

***Ključne riječi:** geopjena, nasipi, klizišta, temeljenje, projektiranje, uzgon*

***Abstract.** Geofoam in civil engineering has been primarily applied in embankment construction for many years. The application of geofoam in those constructions is suitable whenever the design tends to minimize or completely eliminate the settlement. The basic principle of that solution is to build an embankment using a extremely lightweight, sufficiently rigid and strong material, which will ultimately not lead to additional stresses in the soil. The paper provides an overview of key features and principles from manufacturing to installation of geofoam which are essential for the design and execution. In addition to case histories presented in this paper, the paper also provides a proposal and application of geofoam on soft soils. This paper provides guidelines for application of geofoam in wide construction area.*

***Keywords:** geofoam, embankments, landslides, foundation, design, buoyancy*

* Jadranka d.d., Dražica 1, Mali Lošinj
E-mail: katja2512@gmail.com;

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: leomat@gradri.hr

1. Uvod

Ekspandirani ili pjenasti polistiren (u daljnjem tekstu EPS) je kruti celularni plastični materijal koji se sastoji od mnoštva zatvorenih, međusobno čvrsto staljenih ćelija ispunjenih zrakom. Osnovno svojstvo je njegova izrazito mala gustoća (od 10 do 100 kg/m³) jer se sastoji od 98 % zraka i 2 % polistirena.

Primjena EPS-a u građevinarstvu je široka, a u području geotehnike se EPS između ostalog pojavljuje kao osnovno gradivo proizvoda koji se naziva geopjena (eng. geofoam) [1]. Geopjena se proizvodi u obliku blokova, a primarna joj je funkcija ispuna dijela zemljanih objekata kao što su nasipi upornjaka kod mostova i slično. Uporabom lagane geopjene umjesto teških zemljanih materijala znatno se smanjuju dodatna opterećenja u tlu, a time i slijeganje tla.

Od 1965. do 1973. godine u Norveškoj se provodio istraživački projekt djelovanja mraza na tlo. Projekt je uključivao proučavanje različitih izolacijskih materijala u obliku ploče debljine 50-100 mm za zaštitu kolnika od mraza (ekstrudiranog polistirena-XPS i ekspandiranog polistirena-EPS). Istraživanja su pokazala da EPS može izdržati opetovana naprezanja koja se pojavljuju u cestovnoj konstrukciji uslijed prometa. Istraživanje je prošireno na način da se ispita ponašanje EPS blokova posloženih u slojevima veće debljine, odnosno primjene EPS u obliku blokova. Kao rezultat tog istraživačkog projekta, norveška uprava za javne ceste je 1972. godine prihvatila korištenje EPS blokova kao lagane ispune u cestovnim nasipima. Do danas postoji veći broj uspješno realiziranih projekta u kojima je korištena EPS geopjena širom svijeta, no za sada nije poznata niti jedna primjena EPS geopjene u Hrvatskoj [2].

2. Proizvodnja EPS geopjene

EPS se proizvodi iz zrnja polistirena. Proizvodnja zrnja polistirena započela je 1954. godine u koncernu BASF pod zaštićenim imenom Styropor®. Proizvodnja se pod raznim trgovačkim nazivima proširila svijetom, a EPS postaje dominantan proizvod za toplinsku i zvučnu izolaciju u graditeljstvu [3].

2.1. Proizvodnja zrnja polistirena

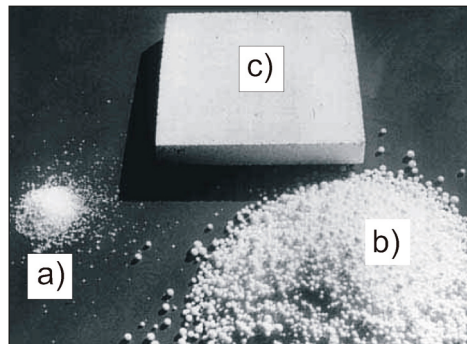
Polazna sirovina za proizvodnju zrnja polistirena je stiren (monomer). U postupku polimerizacije stirenu se uz vodu dodaje i pjenilo pentan koje se zagrijavanjem na temperaturi od cca 90°C raspada i oslobađa plinove koji unutar polimera stvaraju pore. Kapljice stirena suspendirane u vodenoj fazi na kraju polimerizacije prelaze u zrnje (kuglice) ekspandiranog polistirena

raznih granulacija. Razlikuju se četiri osnovne frakcije veličine zrnja koje se označavaju brojevima od 3 (najveće zrnje) do 6 (najsitnije zrnje). Zrnje se u odjeljivaču suši, odjeljuje po granulaciji i prenosi u spremnike.

2.2. Prerada ekspaniranog polistirena

Prerada ekspaniranog polistirena provodi se u tri faze [3] (Slika 1):

- **Prva faza – Predekspanzija** (upjenjavanje) Prva faza se provodi u predekspanderima gdje se zrnje zagrijava zasićenom vodenom parom na temperaturi iznad 80-100 °C pri čemu dolazi do omekšavanja zrnja polistirena i ekspanzije pjenila (pentana) i njegove difuzije iz zrnja. Uslijed toga zrnje ekspanira povećavajući svoj volumen za 30 do 50 puta, a istovremeno se gustoća smanji sa oko 600 kg/m³ na 10 kg/m³ do 30 kg/m³. Gustoća ekspaniranog zrnja ovisi o vremenu zadržavanja zrnja u predekspanderu, temperaturi pjenjenja, tlaku pare, sadržaju pentana te molekularnoj strukturi polimera.



*Slika 1. Prerada ekspaniranog polistirena:
a) sirovo zrnje, b) upjenjeno zrnje, c) čvrsti blok [4]*

- **Druga faza – kondicioniranje:** Nakon upjenjavanja, čim se ekspanirano zrnje počne hladiti, unutar ćelija se kondenzira pentan i stvara se vakuum. Kako bi se vakuum u zrnju izjednačio s atmosferskim tlakom te time omogućila difuzija vodene pare i zaostalog pentana, ekspanirano zrnje se skladišti u platnenim silosima. Vrijeme kondicioniranja ovisi o temperaturi skladišnog prostora, vlažnosti i gustoći upjenjenog zrnja te gustoći gotovog proizvoda. Procesom kondicioniranja zrnje dobiva potrebnu mehaničku čvrstoću i oblikovnu stabilnost.
- **Treća faza – oblikovanje:** U trećoj fazi se zrnje dozira u zatvorene metalne kalupe, tzv. blok forme u kojima se ponovno tretira zasićenom vodenom parom. Ćelije ekspaniranog zrnja omekšavaju i proces

ekspanzije se sada odvija pod utjecajem mješavine pentana i zraka pri čemu dolazi do dodatnog povećanja volumena ekspandiranog zrnja. U zatvorenom kalupu daljnje povećanje volumena nije moguće te dolazi do međusobnog sljepljivanja zrnja u cjelovit, mehanički čvrsti blok ekspandiranog polistirena koji mora odležati određeno vrijeme kako bi se ohladio i oblikovno stabilizirao.

2.3. Stabilizacija blokova

Prije uporabe blokovi moraju odležati jer je samo suhi EPS bez kondenzirane vode i pentana siguran za primjenu.

Blokovi EPS se za vrijeme stabilizacije skladište u posebno opremljenim prostorima. Potrebno vrijeme za oblikovnu stabilizaciju nije određeno normom i ovisi o tehnologiji proizvođača i ulaznim sirovinama. Proizvođač temeljem mjerenja određuje potrebno vrijeme stabilizacije i jamči kvalitetu proizvoda. Suvremenim vakuum postupkom izvlači se voda i zaostali pentan, što znatno skraćuje vrijeme formiranja blokova i njihove stabilizacije.

Nakon perioda oblikovnog stabiliziranja, EPS blokovi se režu vrućom žicom. Kontrolira se dužina, širina i debljina izrezanih ploča.

Postupak proizvodnje i oblikovanja znatno utječe na kvalitetu i svojstva ekspandiranog polistirena koja su bitna za njegovu daljnju uporabu u građevini. U građevinarstvu se najčešće koristi EPS gustoće 10-30 kg/m³ u obliku ploča i panela u visokogradnji (toplinska izolacija, zvučna izolacija, dilatacije, samonosivi i pregradni zidovi i dr.), te blokova u geotehnici.

3. Svojstva EPS geopjene

Svojstva EPS proizvoda ovise prvenstveno o tehnologiji proizvodnje. Ugađanjem parametara procesa proizvodnje, kao što su različite gustoće i strukture, postižu se odgovarajuća potrebna fizička i mehanička svojstva, [1].

3.1. Fizička svojstva

Sa stajališta projektiranja, izgradnje i troškova održavanja, bitna fizička svojstva EPS geopjene su gustoća, fuzija, dimenzije bloka, boja, zapaljivost, gorivost i apsorpcija vode.

3.1.1. Gustoća

Gustoća EPS geopjene može se smatrati glavnim pokazateljem za većinu njezinih mehaničkih svojstava kao što su: tlačna čvrstoća, posmična čvrstoća,

vlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, krutost, puzanje i dr. Za gustoću EPS primarno je kontroliranje gustoće u prvoj fazi proizvodnje (predekspanzija).

Raspon gustoće EPS geopjene je od 10 do 100 kg/m³. U geotehnici se najčešće koriste EPS geopjene raspona gustoća od 10 do 30 kg/m³ (Tablica 1), dok se npr. u visokogradnji koriste EPS proizvodi veće gustoće. Zbog male gustoće, EPS blokovi geopjene su lagani pa se njima može lako rukovati nakon proizvodnje i tijekom skladištenja, transporta ili postavljanja.

Tablica 1. Tipovi EPS-a u SAD-u [5]

Tip	XI	I	VIII	II	IX
Gustoća (kg/m ³)	12	15	18	22	29

Problem vezan uz gustoću EPS blokova je što će unutar svakog bloka postojati razlike u gustoći, tj. gradijenti gustoće koji su rezultat sastavnih promjenjivosti u procesu proizvodnje EPS geopjene. Prosječni gradijenti gustoće iznose $\pm 10\%$ u odnosu na neku nominalnu vrijednost gustoće. Zbog toga se gustoća relativno malog uzorka EPS geopjene izrezanog iz bloka može bitno razlikovati od gustoće cijeloga bloka, što je važno znati prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava EPS geopjene.

3.1.2. Fuzija

Fuzija se kod EPS geopjene odnosi na termalnu fuziju (spajanje) između ekspaniranog zrnja koje se odvija tijekom treće faze proizvodnje pri konačnom oblikovanju bloka. Fuzija je najvažniji faktor koji utječe na otpornost EPS geopjene na vlagu, pa se dobrom fuzijom smanjuje količina apsorbirane vode. Od mehaničkih svojstava, fuzija utječe na vlačnu čvrstoću i trajnost gotovog EPS bloka u cjelini.

3.1.3. Dimenzije blokova

Dimenzije EPS blokova su primarno vođene kalupom koji se koristi u proizvodnji. Nema standardne veličine kalupa koja se koristi u svijetu, pa postoje razlike u veličinama blokova.

3.1.4. Zapaljivost

Proizvodi od EPS geopjene su zapaljivi (450-500°C) i ne smiju biti izloženi otvorenoj vatri i drugim izvorima zapaljenja. Zapaljivost EPS materijala u

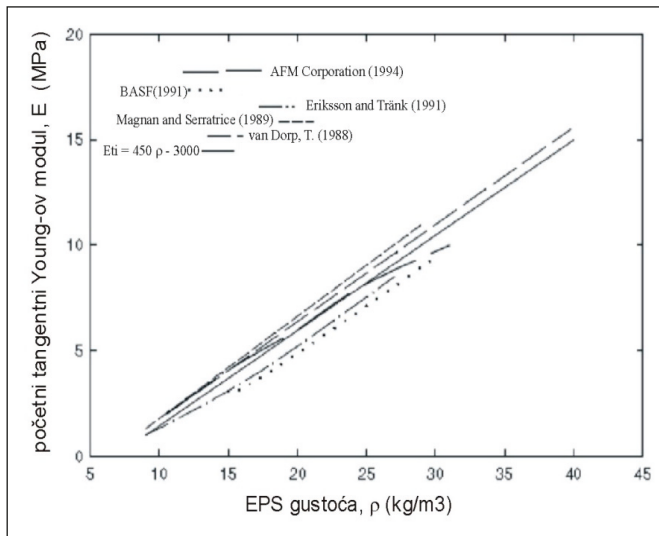
SAD-u se izražava graničnim indeksom kisika (LOI- *Low Oxygen Index*) kojim se izražava minimalna koncentracija kisika u materijalu koja će podržavati gorenje. Što je LOI veći, materijal je otporniji na gorenje i manja je vjerojatnost zapaljenja materijala. Granični LOI je 21 %. Osnovni EPS je zapaljiv i ima LOI 18 %. Dodavanjem samogasivih aditiva (npr. heksabromciklododekan) u EPS povećava se otpornost materijala na gorenje. Prema ASTM normama [5], EPS niske zapaljivosti mora imati LOI od 24 %. Preporučena vrijednost maksimalne radne temperature EPS geopjenom je do 90 °C, a iznad te temperature dolazi do taljenja.

3.1.5. Apsorpcija vode

EPS geopjena apsorbira malu količinu vode tijekom vremena, što ne utječe na mehanička svojstva i dimenzije EPS bloka, već samo povećava toplinsku provodljivost. Apsorpcija vode se smanjuje dobrom fuzijom i povećanjem gustoće EPS geopjene.

3.2. Mehanička svojstva

Osnovna mehanička svojstva EPS geopjene su stišljivost i tlačna čvrstoća (Slika 2, Tablica 2), te posmična čvrstoća na međuvezama blokova EPS geopjene.



Slika 2. Korelacija između gustoće i početnog tangencijalnog Young-ovog modula elastičnosti modeliranog EPS bloka, [6, 7, 8, 9]

Tablica 2. Tlačna čvrstoća EPS-a, [5]

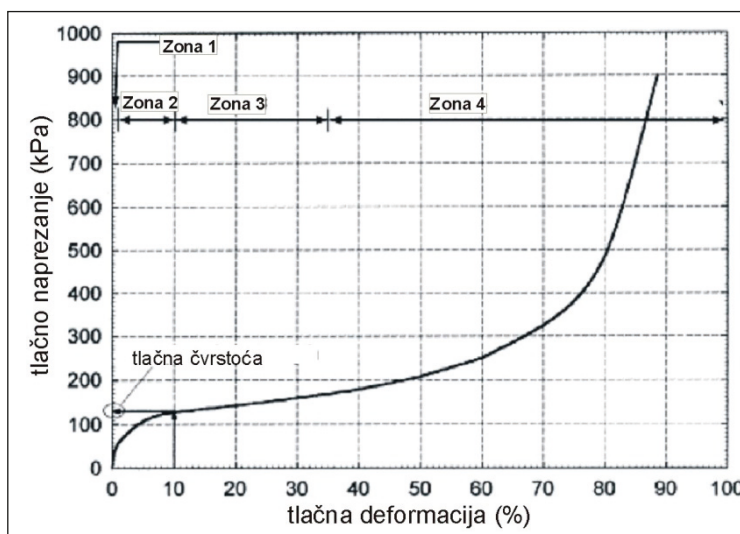
Gustoća (kg/m³)	12	15	18	22	29
Tlačna čvrstoća pri slomu ili pri deformaciji od 10 % (kPa)	35	69	90	104	173

Stišljivost i tlačna čvrstoća EPS geopjene su bitne kod proračuna unutarnje stabilnosti i u izravnoj su vezi s gustoćom EPS geopjene. Posmična čvrstoća na međuvezama blokova EPS geopjene bitna je kod proračuna i unutarnje i vanjske stabilnosti.

3.2.1. Stišljivost

Kada se u nasipima EPS geopjena koristi kao lagana ispuna, tada je ona pretežno tlačno opterećena zbog čega se na uzorcima EPS geopjene najčešće provode ispitivanja tlačne čvrstoće s mjerenjem deformacija. Unutar elastičnog područja Poisson-ov koeficijent n je relativno malen, pa se često uzima da je jednak nuli.

Radni dijagram pokazuje da EPS geopjena nakon dosezanja tlačne čvrstoće popušta na način da se gnječi jednodimenzionalno sve do krutog stanja polistirena (Slika 3).



Slika 3. Radni dijagram EPS bloka (naprezanje-deformacija), gustoće 21kg/m³ pod tlačnim opterećenjem s kontrolom deformacije sa relativnom brzinom deformacije od 10 % u minuti

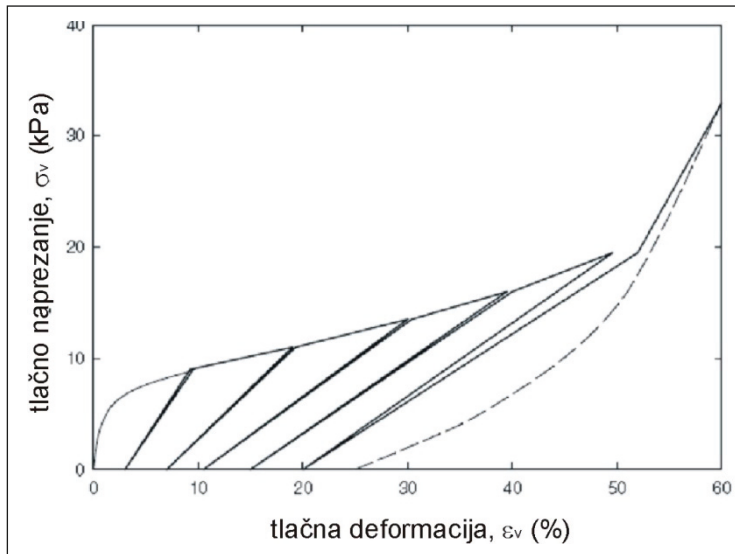
Puzanje je deformacija koja nastupa tijekom vremena pod konstantnim opterećenjem ili naprežanjem. Na geološko ponašanje EPS geopjene bitno utječe gustoća EPS geopjene, intenzitet naprežanja, trajanje opterećenja i temperatura. Niža gustoća EPS geopjene vodi većim deformacijama puzanja.

U praksi se deformacije puzanja uzimaju u obzir kod projektiranja nasipa od EPS geopjene. Projekti se baziraju na laboratorijskim ispitivanjima puzanja provedenim na uzorku EPS geopjene izrezanog iz istog EPS bloka koji će se koristiti u izgradnji.

3.2.2. Cikličko opterećenje

U velikom broju situacija (prometno i dinamičko opterećenje) EPS geopjena je izložena cikličkom opterećenju.

Laboratorijska ispitivanja su pokazala da se EPS geopjena pod cikličkim opterećenjem ponaša linearno elastično do razine deformacije od 1 %, nakon čega se pojavljuje i plastična deformacija. Pored toga, kod ponovnog opterećenja u slijedećem ciklusu, Young-ovog modul elastičnosti se smanjuje u odnosu na početni (Slika 4).



Slika 4. Ponašanje modeliranog EPS bloka gustoće 13kg/m^3 pod cikličkim opterećenjem

3.2.3. Posmična čvrstoća (otpor klizanju)

Posmična čvrstoća na dodirnim plohama blokova EPS geopjene bitna je za proračun vanjske i unutarnje stabilnosti pod djelovanjem lateralnog opterećenja kao što su vjetar, neuravnotežena voda ili seizmičko opterećenje. S obzirom na položaj blokova EPS geopjene, razlikuju se dvije vrste međuveza kod primjene EPS geopjene kao lagane ispune:

- unutarnja međuveza između blokova EPS geopjene (EPS/EPS) i
- vanjska međuveza između EPS i okolnog materijala (tlo, geosintetici, beton).

Na posmičnu čvrstoću na EPS/EPS međuvezi utječe glatkoća površine EPS bloka (Tablica 3). Vrijednost koeficijenta trenja, m , na EPS/EPS međuvezi obuhvaća određeno područje između 0,5 i 0,7. Pri dimenzioniranju dodatni posmični otpor postiže se ugradnjom moždanika između EPS blokova.

Na rubnom području u kontaktu EPS blokova s drugim materijalima postavlja se razdjelni sloj. Materijali koji se koriste kao razdjelni slojevi između temeljnog tla i EPS blokova su granulirani pijesak ili geotekstil, a materijali koji se koriste kao razdjelni slojevi između EPS blokova i kolničke konstrukcije su geotekstil, geomembrane, PCC ploče, geomreže ili geosaće. Kut trenja, d , na međuvezi EPS/pijesak je između 27° i 33° .

Tablica 3. Kutevi trenja EPS blokova na međuvezama, [10]

Međuveza	Vršni kut trenja	Rezidualni faktor kut trenja
EPS-EPS, 20kg/m ³ (suho)	40,4	35,0
EPS-EPS, 20kg/m ³ (mokro)	38,7	33,0
EPS-EPS, 30kg/m ³ (suho)	40,4	33,0
EPS-EPS, 30kg/m ³ (mokro)	36,9	33,0
EPS- na mjestu lijevani beton	67,0	45,0
EPS-Tkana HDPE Membrana	45,0	45,0
EPS- Glatka HDPE Membrana	16,2	13,0
EPS-Glatka PVC Membrana	35,0	21,8

3.2.4. Čvrstoća na savijanje

Ispitivanja pokazuju da postoji linearna veza između čvrstoće na savijanje i gustoće EPS geopjene (Tablica 4).

Tablica 4. Čvrstoća na savijanje EPS-a, [5]

Gustoća (kg/m ³)	12	15	18	22	29
Minimalna čvrstoća na savijanje (kPa)	70	173	208	276	345

3.3. Toplinska svojstva

EPS geopjena se sastoji od 98 % zraka i 2 % polistirena. Zatvoreni zrak unutar EPS geopjene je slab vodič topline što je čini izvrsnim toplinskim izolatorom, no apsorpcijom vode se smanjuju ta svojstva.

Toplinska svojstva za primjenu EPS geopjene kao lagane ispune nisu od primarnog interesa, no treba ih uzeti u obzir kod razmatranja utjecaja nejednolikog zaleđivanja i nejednolikog sunčevog zagrijavanja kod projektiranja kolničkih konstrukcija. Toplinska svojstva EPS geopjene bitno se razlikuju u odnosu na prirodne zemljane materijale. Zbog te razlike u toplinskim svojstvima, površina kolnika koja leži na EPS geopjeni biti će različite temperature od površine kolnika koja leži na zemljanoj posteljici. Dio kolnika koji leži na EPS geopjeni će biti hladniji zimi i topliji ljeti. Dvije posljedice neslaganja u toplinskim svojstvima su diferencijalno zaleđivanje površine kolnika tijekom hladnijih dana i sunčevo zagrijavanje površine kolnika tijekom toplijih dana. Zimi u slučaju zaleđivanja kolnik postaje opasan za vožnju, a ljeti uslijed zagrijavanja dolazi do mekšanja i raspucavanja kolnika, što kao posljedicu ima stvaranje vlačnih pukotina i kolotraga na kolniku. Navedeni nepovoljni utjecaji mogu se umanjiti postavljanjem razdjelnog sloja zemljanog materijala minimalne debljine 610 mm između vrha EPS mase i površine kolnika.

3.4. Kemijska svojstva - otpornost na kemikalije

Općenito, EPS je neotporan na djelovanje organskih otapala (ljepila za gumu ili plastiku, boje), a otporan je na djelovanje svih građevinskih ljepila, mortova, žbuka i bitumenskih proizvoda zagrijanih do 80°C. (Tablica 5),

Tablica 5. Otpornost EPS-a na razne tekućine, [4]

Izvor utjecaja	Otpornost EPS-a
Slana voda (Morska voda)	Otporan
Otopine lužina	Otporan
Sapuni	Otporan
Oksidirani bitumen	Otporan
Silicijska ulja	Otporan
Alkohol	Otporan
Mikroorganizmi	Otporan
Parafin, vaselín, dizelska ulja	Ograničeno otporan
Benzin	Neotporan
Jake oksidirajuće kiseline	Neotporan
Sumporne kiseline	Neotporan
Organske otopine	Neotporan
Zasićeni alifatski ugljikovodici	Neotporan

Kod primjene EPS geopjene u cestovnim nasipima, projektom i izvođenjem mora se spriječiti kontakt EPS geopjene s gorivom (benzin i dizelsko gorivo). Za zaštitu EPS geopjene od kemikalija koriste se odgovarajući geosintetici ili betonske ploče.

3.5. Utjecaj sunčevog zračenja - UV degradacija

Ako je EPS blok duže mjeseci izravno izložen UV-zrakama, doći će do degradacije površine bloka, tj. površina bloka će požutiti i postati krhka i kredasta. Degradacija površine bloka ima utjecaj na kut trenja između EPS blokova i između EPS blokova i drugih građevinskih materijala. Stoga se u slučaju dužeg zastoja ili prekida gradnje EPS blokovi moraju prekriti.

3.6. Biološka svojstva - insekti

EPS geopjena nema nutritivne vrijednosti niti za jedan živi organizam ili životinju, međutim, insekti poput termita i mrava mogu se gnijezditi u blokovima EPS geopjene. Taj problem se rješava dodavanjem kemijskih aditiva koji tjeraju insekte od EPS geopjene. EPS ne podržava razvijanje gljivica ili bakterija.

3.7. Utjecaj na okolinu

Sastavno, EPS nema štetnog utjecaja na ljude i okoliš. EPS nije biorazgradiv, ne zagađuje tlo i podzemnu vodu te ne sadrži plinove koji se tijekom proizvodnje oslobađaju i koji bi mogli štetiti ozonskom omotaču.

EPS je materijal koji se može 100 % reciklirati. Otpadni EPS stavlja se u uređaj za mljevenje i vraća se ponovo u proizvodnju novih blokova koji mogu sadržavati do 15 % recikliranih mljevenih granula. Reciklirane granule se još koriste kod izrade lakih betona (stiropor betona) ili za poboljšanje prozračnosti tla.

4. Primjene geopjene u geotehnici

EPS geopjene se prema svojim funkcijama dijele na:

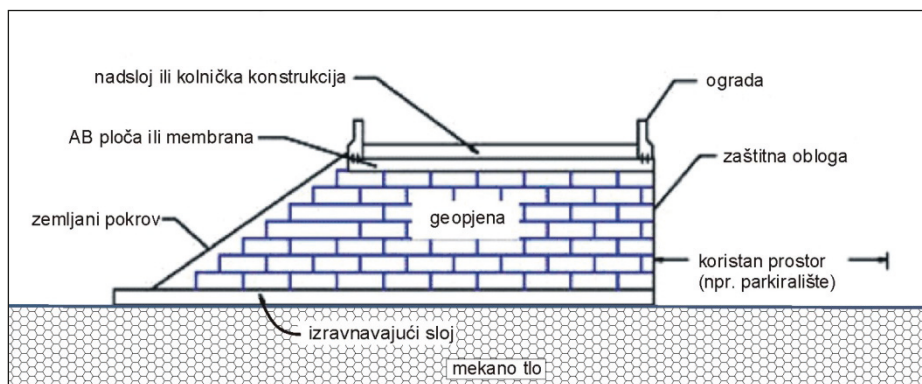
- laganu ispunu,
- deformabilnu traku,
- toplinsku izolaciju,
- vibracijsku izolaciju.

Svojstva EPS geopjene koja su bitna za njezinu geotehničku primjenu su: gustoća, stišljivost, toplinska otpornost, izolacija (prigušenje) vibracija i samonosivost.

4.1. Smanjenje slijeganja kod nasipa

EPS geopjena kao lagana ispuna primarno se koristi u slučajevima gdje se u podlozi nalazi slabonosivo tlo jer se praktički u tlo ne unose dodatna naprezanja koja izazivaju slijeganje [11, 4]. Osnovna prednost korištenja EPS geopjene kao materijala za ispunu nasipa je ta da je do 50 puta manje težine od tradicionalnih laganih ispuna (usitnjena kora drveta, piljevina, lebdeći pepeo, šljaka, lagani agregati, morske školjke itd.).

Uobičajeno se nasipi ispunjeni EPS geopjenom izvode na način da se slojevi EPS blokova postavljaju na izravnavajući sloj pijeska ili tucanika na koji se postavljaju uzastopni slojevi od EPS blokova do potrebne visine nasipa. Na završnom sloju blokova postavlja se armirano betonska ploča koja služi za raspodjelu opterećenja i kao zaštita EPS mase. Na AB ploču postavljaju se zbijeni slojevi posteljice te kolnički zastor. Kosine nasipa se pokriju zemljanim pokrovom kako bi se zaštitila EPS masa (Slika 5, Slika 6)



Slika 5. Nasip od EPS blokova s kosom i vertikalnom stranom



Slika 6. Primjer izgradnje nasipa od EPS geopjene (Hardinxveld-Giessendam, Nizozemska), [4]

4.2. Stabilizacija kosine

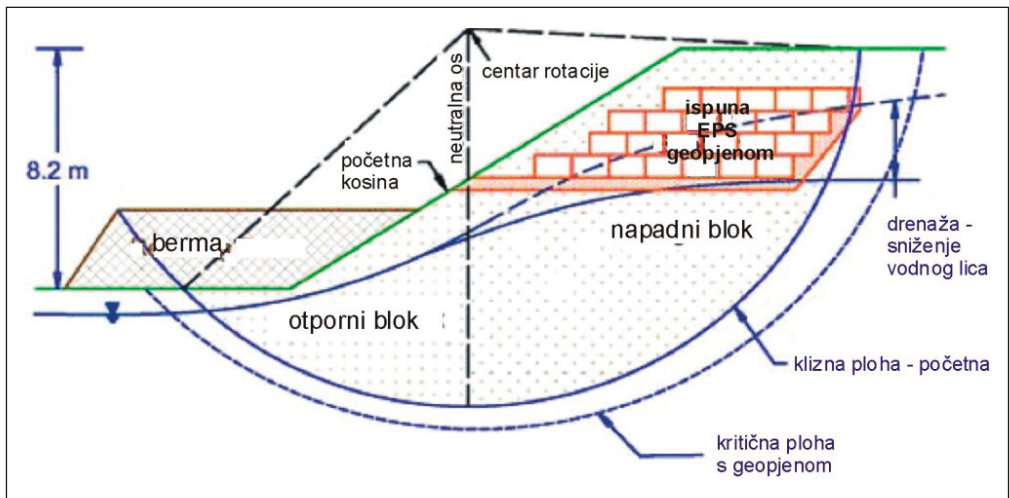
Stabilizacija kosine EPS geopjenom sastoji se od iskopa tla u gornjem aktivnom dijelu kosine i zamjene s EPS geopjenom čija je gustoća 50-100 puta manja od tla. Time se smanjuje težina aktivnog dijela kosine čime se smanjuju posmična naprezanja na plohi sloma te povećava faktor sigurnosti (Slika 7, Slika 8). Na faktor sigurnosti kosine stabilizirane s EPS geopjenom utječu:

- svojstva tla kao što su posmična čvrstoća, gustoća i strujni tlak,
- geometrija kosine kao što su nagib i visina kosine,
- količina i raspodjela EPS blokova.

Količina i raspodjela EPS blokova ovise o vrsti tla na kosini. Kod korištenja EPS blokova na kosinama koje se sastoje od nekoherentnog tla gdje se pojavljuje plitka zona sloma, dodavanjem blokova neće se utjecati na faktor sigurnosti. Kod kosina koje se sastoje od koherentnih tala gdje je zona sloma duboka, povećanjem količine EPS blokova povećat će se i faktor sigurnosti.

Uobičajeno se kosine stabilizirane EPS geopjenom izvode na način da se slojevi EPS blokova postavljaju na izravnavajući sloj pijeska ili tucanika debljine 15 cm. Na završnom sloju blokova postavlja se armirano betonska ploča koja služi za raspodjelu opterećenja i kao zaštita EPS mase.

Važno je istaknuti da se upotrebom EPS geopjene kod stabilizacije kosina jednostavno rješava dreniranje na način da se u blokovima izrezuju otvori kroz koje se drenira voda iz podzemlja (Slika 9).



Slika 7. Kosina stabilizirana EPS geopjenom,



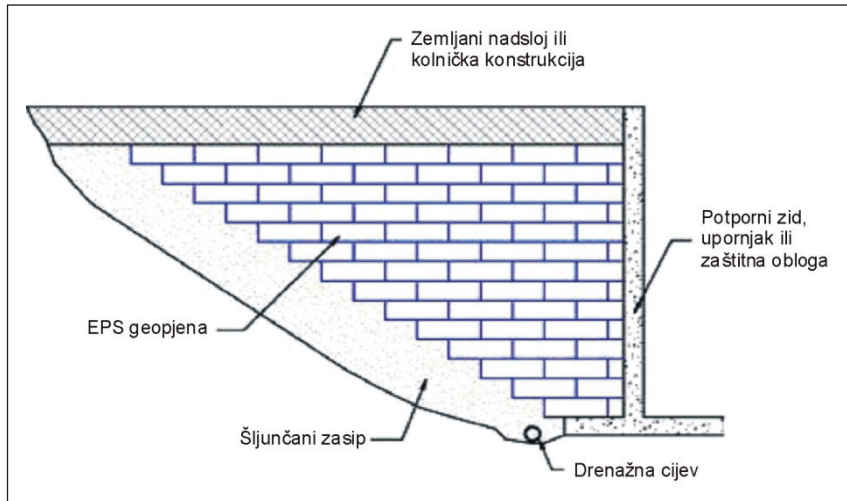
Slika 8. Primjer sanacija cestovnog nasipa na planinskoj cesti uporabom EPS geopjene (Sougdahl, Norveška), [4]



Slika 9. Primjer rješenja drenaže kod nasipa s EPS geopjenom, [4]

4.3. Redukcija bočnog pritiska na potporne konstrukcije

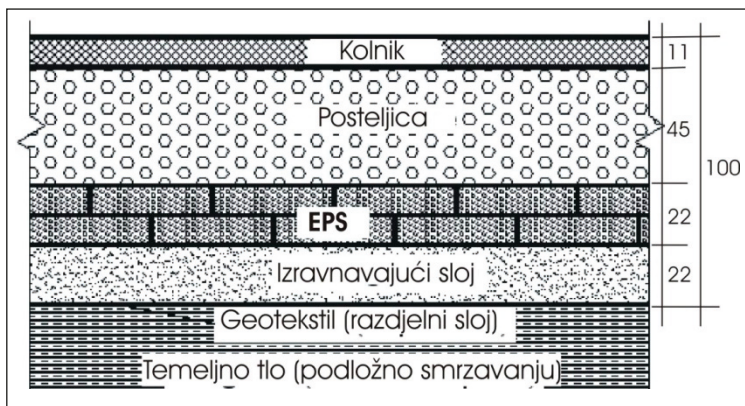
Bočni pritisak na potporne konstrukcije se pojavljuje kao statički zemljani pritisak, pritisak tijekom ekspanzije tla te dinamičko opterećenje od potresa i prometnog opterećenja. Postavljanjem EPS ispune iza potpornih zidova, upornjaka mosta ili nosača smanjuje se djelovanje bočnog pritiska, prvenstveno zbog njezine male gustoće, zbog čega se također smanjuju i vertikalna naprezanja iza potpornih konstrukcija, što rezultira manjim slijeganjima (Slika 10).



Slika 10. EPS geopjena kod potpornih konstrukcija,

4.4. Izolacija kolnika

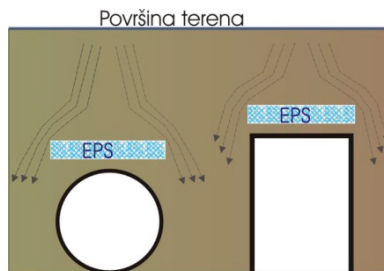
EPS geopjena se koristi i kao izolacija posteljice cesta i željeznica. Ciklusi zamrzavanja i topljenja tla uzrokuju podizanje i spuštanje tla čime se smanjuje životni vijek kolničke konstrukcije zbog oslabljenja posteljice. Postavljanjem EPS geopjene između posteljice i izravnavajućeg sloja postiže se toplinska izolacija posteljice čime se sprečava zamrzavanje. (Slika 11).



Slika 11. Izolacija kolnika pomoću EPS geopjene

4.5. Redukcija napreznja na ukopane cijevi i vodovode

Stišljivi sloj EPS geopjene koristi se kako bi se smanjilo opterećenje na ukopane krute cijevi i vodovode (Slika 12). Tradicionalni materijali koji su se koristili za tu funkciju su bale sijena. Primjena EPS geopjene je povoljnija opcija u odnosu na bale sjena, jer EPS geopjena nije biorazgradiva i neznatno apsorbira vodu.



Slika 12. Redukcija napreznja na cijevi pomoću EPS geopjene

5. Projektiranje nasipa od EPS geopjene

Kod projektiranja nasipa od blokova EPS geopjene promatra se interakcija između tri komponente nasipa: temeljnog tla, lagane ispune nasipa od blokova EPS geopjene i nadsloja, odnosno kolničke konstrukcije [1, 6]. U postupku dimenzioniranja teži se ekonomičnom rješenju na način da se što manje poboljšava temeljno tlo i da nadsloj s kolničkom konstrukcijom bude manjih dimenzija. Nasipi mogu biti trapezni i vertikalni. Kod vertikalnih nasipa, pri dimenzioniranju treba provjeriti stabilnost nasipa za slučaj prevrtanja cijelog nasipa na međuvezi između EPS ispune i temeljnog tla.

U postupku dimenzioniranja nasip od EPS geopjene mora zadovoljiti zahtjeve za vanjskom i unutarnjom stabilnošću. Zahtjevi za vanjskom stabilnošću isti su kao i za druge nasipe, stoga se u nastavku pružaju smjernice za dimenzioniranje u odnosu na unutarnju stabilnost. Kod projektiranja je važno poznavati glavne uzroke sloma nasipa od blokova EPS geopjene, a to su: vatra, diferencijalno zaleđivanje i uzgon. Stoga se navedene projektne situacije projektiranjem trebaju posebno razmotriti za fazu gradnje i fazu korištenja objekta.

U daljnjem tekstu razmatra se samo problem s uzgonom koji se javlja kada su blokovi od EPS geopjene djelomično ili potpuno uronjeni u vodu

(tijekom poplava, jake kiše, toka podzemne vode, plime i sl.). Uzgon se kroz projektiranje i izgradnju uobičajeno svladava na slijedeće načine:

- izvođenjem nadsloja (zemljani pokrov, kolnička konstrukcija i dr.) čija težina uravnotežuje uzgon,
- sidrenjem EPS blokova u temeljno tlo,
- izvođenjem lagane ispune sastavljene od sloja lebdećeg pepela čija je gustoća približno jednaka gustoći vode i sloja EPS geopjene,
- izvođenjem lagane ispune sastavljene od sloja geosaća ispunjenih poroznim zrnima koja će se saturirati i sloja EPS geopjene.

5.1. Unutarnja stabilnost nasipa

Kod dimenzioniranja nasipa od blokova EPS geopjene uvodi se pretpostavka da se nasip ponaša kao jedno tijelo, što se u stvarnosti postiže dobrim horizontalnim i vertikalnim povezivanjem. Provjera unutarnje stabilnosti nasipa obuhvaća slijedeće projektne situacije: prometno opterećenje (nosivost), potres, djelovanje vode i vjetra (translacija).

5.1.1. Nosivost EPS blokova

Pravilnim dimenzioniranjem treba postići da odabrana vrsta EPS geopjene sa svojim dimenzijama na siguran način prenosi težinu kolnika i prometnog opterećenja u temeljno tlo, a da pri tom ne dođe do pretjeranog zbijanja EPS blokova, a time i slijeganja kolnika (Tablica 6). Stoga se proračunom slijeganja moraju obuhvatiti elastične i plastične deformacije s puzanjem koje nastaju od stalne težine te plastične deformacije od prometnog opterećenja.

Tablica 6. Minimalne dozvoljene vrijednosti elastičnog graničnog naprezanja i početni Youngovi moduli, [11]

Oznaka materijala po AASHTO	Suha gustoća cijelog bloka (kg/m ³)	Suha gustoća uzorka izrezanog iz bloka (kg/m ³)	Elastično granično naprezanje (kPa)	Youngov Modul Elastičnosti, E _{ti} (MPa)
EPS 40	16	15	40	4
EPS 50	20	18	50	5
EPS 70	24	22	70	7
EPS 100	32	29	100	10

Vertikalno naprezanje od kolničkog i prometnog opterećenja smanjuje se dubinom nasipa, zbog čega je kod izgradnje nasipa moguće koristiti blokove EPS geopjene različite gustoće. Manje gustoće EPS geopjene koriste se na većim dubinama ili ispod kosina trapeznog nasipa, dok se EPS blokovi veće gustoće postavljaju izravno ispod kolničke konstrukcije. Preporuča se korištenje do dvije gustoće EPS geopjene u jednom projektu.

5.1.2. Unutarnja seizmička stabilnost nasipa

Za slučaj potresa pored analize opće vanjske stabilnosti nasipa analizira se i unutarnja seizmička stabilnost nasipa na dodirnim ploham EPS blokova.

Analiza unutarnje seizmičke stabilnosti nasipa provodi se nakon što su kroz proračune opće vanjske stabilnosti utvrđene mjerodavne klizne plohe za slučaj potresa koje u nasipu prolaze kroz laganu ispunu od blokova EPS geopjene. Daljnjom analizom odabranih kliznih ploha utvrđuju se posmična naprezanja u međuvezama te se pravilnim dimenzioniranjem međuveze omogućava sigurno preuzimanje tih naprezanja.

5.1.3. Translacija od vode i vjetra

Provjera unutarnje stabilnosti nasipa u odnosu na translaciju od vode za slučaj mirnog djelovanja vode temelji se na usporedbi posmičnog otpora međuveza (između slojeva EPS blokova, između kolničke konstrukcije i EPS blokova) s hidrostatskim silama nastalim od jednostrano akumulirane vode (npr. propusti kroz nasip su začepljeni).

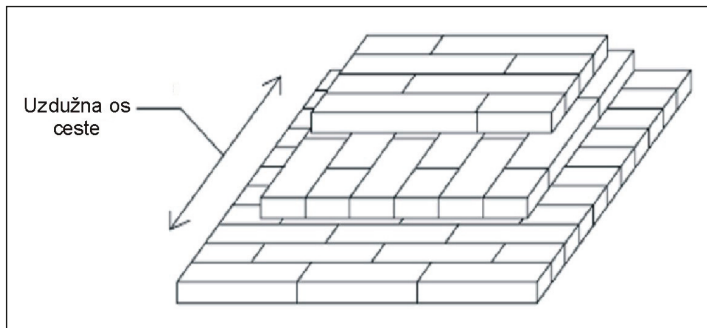
Provjera unutarnje stabilnosti nasipa u odnosu na translaciju od vjetra temelji se na usporedbi posmičnog otpora međuveza (između slojeva EPS blokova, između kolničke konstrukcije i EPS blokova) s horizontalnim silama vjetra.

6. Izgradnja nasipa od EPS geopjene

Izgradnja nasipa od EPS geopjene započinje postavljanjem izravnavajućeg sloja finog pijeska debljine 12-25 mm na odgovarajuće pripremljeno temeljno tlo na koji se postavlja prvi sloj EPS blokova. U izravnavajućem sloju treba postići ravnost površine takvu da vertikalna odstupanja budu do ± 10 mm na 3 m udaljenosti.

Iako se nasip od EPS geopjene sastoji od velikog broja blokova, tijekom projektiranja se pretpostavlja da se ta masa od EPS blokova ponaša kao jedna cjelina koja je izložena vanjskom opterećenju. Da bi se masa od EPS blokova ponašala kao cjelina, EPS blokovi trebaju biti horizontalno i vertikalno

povezani. Povezivanje blokova u vertikalnom smjeru postiže se rasporedom blokova, dok se povezanost u horizontalnom smjeru postiže otpornošću na posmik između blokova. Blokovi trebaju biti raspoređeni tako da horizontalni i vertikalni spojevi između blokova ne budu kontinuirani, što se postiže tako da se svaki sloj blokova postavlja okomito na prethodni sloj. Svi blokovi se trebaju postaviti čvrsto zbijeno uz susjedne blokove (Slika 13).



Slika 13. Tipični raspored EPS blokova za cestovni nasip

Na vrh EPS mase postavlja se betonska ploča koja služi za raspodjelu opterećenja i kao zaštita EPS mase. Za zaštitu EPS mase od goriva (benzin, dizelsko gorivo) koriste se još geosintetici. Na betonsku ploču postavlja se kolnička posteljica. Minimalna potrebna debljina posteljice je 610 mm kako bi se minimalizirale posljedice diferencijalnog zaleđivanja i sunčevog zagrijavanja. Nasipavanja i zbijanja početnog sloja posteljice na betonskoj ploči treba izvoditi na način da rad građevinskih strojeva (npr. vibro valjaka) ne uzrokuje plastične deformacije u blokovima EPS geopjene. Na pokose nasipa postavlja se zemljani pokrov koji služi kao zaštita EPS geopjene, a i kao dodatna nadslojna težina potrebna kada se nasip djelomično nalazi pod vodom.

Zaključak i smjernice za primjenu EPS geopjene u građevinarstvu

EPS je kruti, tvornički proizveden materijal izrazito male gustoće, koji se u građevinarstvu koristi u obliku blokova čije se dimenzije i svojstva mogu prilagođavati zahtjevima projekta. Na gradilištu se lagani EPS blokovi ručno prenose i dodatno oblikuju rezanjem te trenutno nakon ugradnje preuzimaju funkciju za koju su namijenjeni. Namjena EPS blokova u građevinarstvu može biti trajna ili privremena, tehnološka ili konstruktivna. Zbog toga što se lako oblikuju, EPS blokovi se mogu koristiti kao “izgubljena oplata” za izvedbu prodora u konstrukcijama, što predstavlja primjer privremene tehnološke namjene. EPS blokovi se ugrađuju trajno kao konstruktivni elementi zgrade u funkciji toplinske i vibracijske izolacije, dilatacije nosivih dijelova konstrukcije,

redukcije vlastite težine konstrukcije te redukcije opterećenja na konstruktivne elemente. Zbog velikog postotka zraka (cca 95%), EPS blokovi su dobri toplinski izolatori i koriste se u funkciji toplinske zaštite zgrada, industrijskih postrojenja i prometnica, pri čemu se treba osigurati zaštita EPS blokova od djelovanja UV zračenja, izravnog plamena i kemikalija. Zbog male krutosti u odnosu na druge konstruktivne elemente, EPS blokovi se koriste kao vibracijska izolacija, pri čemu deformacije EPS bloka trebaju ostati u elastičnom području, te kao dilatacija konstruktivnih elemenata, pri čemu deformacija može biti i plastična. Ugradnjom EPS blokova u konstrukciju reducira se vlastita težina konstrukcije, što je izrazito važno kada je potrebno smanjiti slijeganja tla. Pri tome se EPS blokovi mogu ugrađivati u nenosive dijelove masivnog betona ili u nosive dijelove zemljanog nasipa. Osim redukcije vertikalnog opterećenja na temeljno zlo, EPS blokovi reduciraju i bočni pritisak na potporne zidove u slučajevima kada se ugrađuju umjesto zemljanog zasipa. Također, postavljanjem EPS blokova iznad cijevi u tlu, opterećenje nadsloja se prenosi bočno u okolno tlo i smanjuje se opterećenje cijevi ugrađene u tlu.

Osim očitih prednosti EPS geopjene kao lagane ispune za širu primjenu, potrebna je dodatna edukacija svih koji su uključeni u projektiranje nasipa, posebno nasipa na slabonosivom tlu (npr. uprave za javne ceste i željeznice, projektantski uredi, izvođači). Svaki od projekta u realizaciji treba dokumentirano tehnički promatrati u fazi gradnje i korištenja, što bi, osim dokaza kvalitete samoga objekta, pružalo dobru podlogu daljnjeg poboljšanja projektiranja primjenom “usporedivog iskustva” prema zahtjevima norme Eurokod 7 [12].

7. Literatura

- [1] NCHRP, *Geofoam Applications in the Design and Construction of Highway Embankments*; Web Document 65 (Project 24-11); Transportation Research Board of National Academies, 792 pp; dostupno na www.trb.org/publications/nchrp/nchrp_w65.pdf, 2004.
- [2] Čuk K., *Slijeganje nasipa na slabonosivom tlu - cestovni nasip od EPS geopjene*, Diplomski, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2011.
- [3] Poparić I i Milavec J., *Ekspandirani polistiren EPS od nafte do ploča za toplinsku i zvučnu izolaciju*, dostupno na www.novolit.si/index.php?option=com_docman&task
- [4] BASF, *Styropor foam as a lightweight construction material for road base-courses*, Techn. Information, BASF, AG, Ludwigshafen, Germany 10 pp, 1993.

-
- [5] ASTM, ASTM C 578-95 Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation, 1995.
- [6] AFM Corporation, *Earthwork; Soil Stabilization, SPEC-DATA® Section 02200*, AFM Corporation, Excelsior, Minn. 4 pp., 1994.
- [7] Eriksson, L., and Tränk, R. (1991), "Properties of Expanded Polystyrene-Laboratory Experiments." *Expanded Polystyrene as Light Fill Material; Technical Visit around Stockholm*, Stockholm, (June 19, 1991).
- [8] Magnan, J.-P., and Serratrice, J.-F. (1989), "Propriétés mécaniques du polystyrène expansé pour ses applications en remblai routier." *Bulletin Liaison Laboratoire Ponts et Chaussées*, , No. 164 pp. 25-31.
- [9] van Dorp, T., "Expanded Polystyrene Foam as Light Fill and Foundation Material in Road Structures (preprint paper)." *The Intern.l Congress on Expanded Polystyrene: Expanded Polystyrene- Present and Future*, Milan, Italy, 1988.
- [10] Elragi, A.F., *Selected engineering properties and applications of EPS Geofoam*, State University of New York. College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, NY, 2000, dostupno na <http://www.softoria.com/institute/geofoam/material.html#36>, 2000
- [11] NCHRP, *Guideline and Recommended Applications in Highway Embankments*, REPORT 529 Transportation Research Board of National Academies : Washington, D.C 2004, 71 pp; dostupno na www.trb.org/publications/nchrp/nchrp_rpt_529.pdf, 2004.
- [12] EN 1997-1:2004. *Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*. CEN, Bruxelles, 2004.

PREUVJETI PRIMJENE USPOREDIVOG ISKUSTVA U PROJEKTIRANJU GEOTEHNIČKIH KONSTRUKCIJA

PREREQUISITES FOR COMPARABLE EXPERIENCE APPLICATION IN GEOTECHNICAL CONSTRUCTION DESIGN

Neven Milohanić*, Leo Matešić**

***Sažetak.** Prema normi Eurokod 7 (Geotehničko projektiranje) rezultate proračuna treba kontrolirati prema usporedivome iskustvu, ako je to moguće. Eurokodom 7 uvedena je geotehnička kategorizacija obzirom na složenost građevine i uvjete na lokaciji gradnje. Za jednostavne konstrukcije koje pripadaju prvoj geotehničkoj kategoriji (zanemariv rizik u pogledu sveukupne stabilnosti ili pomaka temeljnoga tla te za uvjete u temeljnome tlu za koje se iz usporedivoga iskustva zna da su dovoljno jednostavni), dokazivanje stabilnosti i upotrebljivosti građevine u odnosu na geotehničke zahtjeve može se u potpunosti provesti usporedivim iskustvom. Pri tome primjena usporedivog iskustva nužno traži pozivanje na usporedive građevine temeljene u sličnim geotehničkim uvjetima za koje postoji pouzdana i provjerljiva barem projektna i izvođačka dokumentacija s ocjenom ponašanja građevina u eksploataciji. Postoji zakonska obveza trajnog čuvanja projektne i izvođačke dokumentacije građevine, ali je pristup dokumentima otežan zbog toga što nije propisan postupak arhiviranja i upravljanja dokumentima koji bi odgovarao zahtjevima Eurokoda 7. Znatno olakšanje i pouzdanost u korištenju usporedivog iskustva predstavlja računarski informacijski sustav kojim se povezuju različite arhive koje zajedno predstavljaju bazu podataka usporedivog iskustva. Takav informacijski sustav treba omogućiti brzi pregled podataka o usporedivim građevinama i mjesta arhiviranja pripadajuće tehničke dokumentacije. Rad pruža prikaz relacijske baze podataka izrađene za potrebe korištenja*

* Rex inženjering i zaštita okoliša d.o.o., Brionska 11, Poreč
E-mail: neven.milohanic@gmail.com

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: leomat@gradri.hr

usporedivog iskustva za jednostavne građevine. U bazu podataka uneseni su podaci o stvarnim građevinama odabranog područja. Baza podataka omogućuje i kontinuirani unos podataka dobivenih tehničkim promatranjem građevina. Izrađena baza podataka može služiti kao pilot projekt opće baze podataka usporedivog iskustva za potrebe upravljanja izgrađenih građevina i projektiranja novih građevina korištenjem usporedivog iskustva. U radu je dan prijedlog fazne izrade baze usporedivog iskustva s matricom odgovornosti. Osnovni zaključak je da je za primjenu usporedivog iskustva prema zahtjevima Eurokoda 7 nužno propisati postupak prikupljanja, arhiviranja i upravljanja tehničkom dokumentacijom građevina.

Ključne riječi: *usporedivo iskustvo, geotehničko projektiranje, tehničko promatranje, baza usporedivog iskustva*

Abstract. *According to Eurocode 7 (Geotechnical design) if practicable, the design results should be checked against comparable experience. Eurocode 7 has introduced a geotechnical categorization with regard to complexity of the structure and conditions on the building site. In case of simple structures of first geotechnical category (where there is a negligible risk in terms of overall stability or ground movements and in ground conditions which are known from comparable local experience to be sufficiently straightforward), demonstration of stability and usability of the structure with regard to geotechnical requests can entirely be carried out by comparable experience. Implementation of comparable experience requests reference to comparable structures with foundations in similar geotechnical conditions for which there is at least design and executive documentation with evaluation of structure's behaviour during exploitation. There is a legal obligation to archive that documentation but it is difficult to access it because procedure of document management and archiving is not specified, at least not in a way that would comply to Eurocode 7. Computered informational system which connects different archives to database of comparable experience facilitates and contributes to reliability of usage of comparable experience. This informational system should enable quick screening of data of comparable structures and archive locations of regarding technical documentation. This work presents a relational database drafted for simple structures. The database contains data of real structures of selected category. The database also enables continuous input of data obtained through technical monitoring of civil engineering structures. The drafted database can serve as a pilot-project for general database of comparable experience for use in constructed structure management and for use in designing of new structures using comparable experience. This work presents proposition of drafting of database of comparable experience in phases with corresponding matrix of responsibility. Basic conclusion is that for application of comparable experience according to Eurocode 7 it is necessary to regulate procedure for gathering, archiving and managing of technical documentation of the structures.*

Key words: *comparable experience, geotechnical designing, technical monitoring, database of comparable experience*

1. Uvod

U dosadašnjoj praksi projektanti su koristili usporedivo iskustvo kao osobnu kontrolu izravnih proračunskih metoda temeljenih na teoretskim modelima mehanike tla. Norma Eurokod 7 (EN 1997, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje, [1]), uvodi novinu kojom dopušta da se u projektiranju pojedinih geotehničkih konstrukcija (npr. plitkih temelja) koristi neizravna proračunska metoda uz pomoć usporedivoga iskustva. Osim toga, Eurokod 7 postavlja pravilo da se projektni rezultati svih geotehničkih konstrukcija moraju provjeriti usporedivim iskustvom gdje god je to moguće te da se izbor karakterističnih vrijednosti geotehničkih parametara mora zasnivati na rezultatima i izvedenim vrijednostima iz laboratorijskih i terenskih ispitivanja, nadopunjenima dobro uspostavljenim iskustvom. Korištenje usporedivog iskustva u projektiranju geotehničkih konstrukcija pruža ekonomičniji i sigurniji projekt jer se mogu izostaviti pojedina ispitivanja kao što su probna polja za izvedbu nasipa, pilota i geotehničkih sidara. Ispitivanje nasipa nije potrebno provoditi za neke kombinacije materijala i postupaka zbijanja ako je postupak zbijanja dokazan pokusnim poljem ili usporedivim iskustvom. Pokusno opterećenje pilota ne mora se provesti ako se koristi ona vrsta pilota ili metoda ugradnje za koju postoji usporedivo iskustvo. U projektu sidrenja i određivanju izvedbe sidara smiju se uporabiti samo oni sustavi sidrenja koji su ispitani istraživanjem ili za koje postoji dokumentirano, uspješno usporedivo iskustvo obzirom na njihovo ponašanje i trajnost.

No, za primjenu usporedivog iskustva moraju se zadovoljiti zahtjevi koji proizlaze iz definicije usporedivog iskustva [1], koja glasi: *“usporedivo iskustvo su dokumentirani ili na koji drugi način jasno utvrđeni podaci o temeljnom tlu iz projekta, koji se odnose na iste vrste tla i stijene za koje se očekuje slično geotehničko ponašanje i na slične konstrukcije. Lokalno dobiveni podaci se smatraju posebno važnima.”* Iako definicijom nije izravno određeno, usporedivo iskustvo mora biti dokumentirano i arhivirano na način da se pristup dokumentima omogući projektantima, revidentima i tijelima uprave koje izdaju odgovarajuće dozvole jer pozivanjem projektanta na usporedivo iskustvo dokumenti, kao što su elaborati o istražnim radovima, postaju podloga projekta. Primjena usporedivog iskustva nužno traži pozivanje na usporedive građevine temeljene u sličnim uvjetima za koje postoji pouzdana i provjerljiva projektna i izvođačka dokumentacija s ocjenom ponašanja građevine u eksploataciji. Javni interes je očit, no nije propisan način na koji se podaci o usporedivom iskustvu prikupljaju i arhiviraju, niti je propisano tko je za to zadužen. Začetak ideje nudi Eurokod 7 koji uvodi pravilo da se za vrijeme praćenja ponašanja građevine kroz tehničko promatranje treba voditi zapisnik o stvarnom ponašanju konstrukcije radi prikupljanja podataka za bazu podataka

usporedivoga iskustva. Nažalost, nije određeno tko je odgovoran za stvaranje i održavanje baze podataka usporedivoga iskustva.

Bez obzira na to tko će biti odgovoran za bazu podataka usporedivog iskustva, prvi korak u stvaranju baze podatka je analiza trenutnog smještaja relevantnih dokumenata, odnosno projektne i izvođačke dokumentacije, te izvješća o tehničkom promatranju.

Prema važećem zakonu, čuvanje cjelokupne projektne i izvođačke dokumentacije je obveza investitora, odnosno vlasnika građevine [2]. Tehničko promatranje propisano je kao obveza samo za neke građevine (npr. visoke brane, [3]), no mnogi vlasnici, odnosno upravitelji zbog potreba održavanja provode tehničko promatranje svojih građevina. Osim toga, i tijela uprave čuvaju primjerke projektne dokumentacije temeljem koje su izdale odgovarajuće dozvole za gradnju.

Mogući oblici baze podatka usporedivog iskustva su decentralizirana poliformna baza podataka (povezane različite baze podataka) ili centralizirana uniformna baza podataka. Centralizirana uniformna baza podataka pruža veću pouzdanost, ali ima veće troškove početnog ulaganja i tekućeg održavanja u odnosu na decentraliziranu poliformnu bazu podataka. Bez obzira na oblik baze podataka usporedivog iskustva, nakon njenog pokretanja nove podatke o građevinama treba unositi jednoobrazno.

Kod odabira strukture baze podataka usporedivog iskustva treba analizirati postojeće primjenjive baze podatka i nove baze podatka namijenjene usporedivom iskustvu. Norma Eurokod 7 uvodi geotehničku kategorizaciju građevine obzirom na složenost građevine i uvjete na lokaciji gradnje. Za jednostavne konstrukcije koje pripadaju prvoj geotehničkoj kategoriji (zanemariv rizik u pogledu sveukupne stabilnosti ili pomaka temeljnoga tla te za uvjete u temeljnome tlu za koje se iz usporedivoga iskustva zna da su dovoljno jednostavni), dokazivanje stabilnosti i upotrebljivosti građevine u odnosu na geotehničke zahtjeve može se u potpunosti provesti usporedivim iskustvom. Svaku inačicu baze podatka usporedivog iskustva najlakše je početno izraditi i ispitati za jednostavne građevine, a kasnije u bazu podataka uvesti i složene građevine [4].

2. Tehničko promatranje

Tehničko promatranje (opažanje) je skup projektom određenih aktivnosti kojima se sustavno dokumentira ponašanje građevine u vremenu, što omogućuje usporedbu i analizu ostvarenog u odnosu na projektom predviđeno ponašanja. Svrha tehničkog promatranja građevine je osiguranje mehanizma koji u izvanrednim okolnostima omogućuje ispravnu, pouzdanu i pravovremenu

reakciju, a u redovnim okolnostima pruža smjernice poboljšanja trenutnog stanja i racionalnog održavanja građevine.

Općenito, u svim pravilnicima i propisima koji uređuju projektiranje građevina ugrađeno je teorijsko znanje i stečeno iskustvo. Gradnjom, ispitivanjem i korištenjem svake građevine provjerava se primjerenost projektiranja i stiče se novo iskustvo. Ako to iskustvo nije sustavno i praćeno dokumentirano kroz tehničko promatranje, ono ostaje neprimjenjivo za poboljšanje projektiranja.

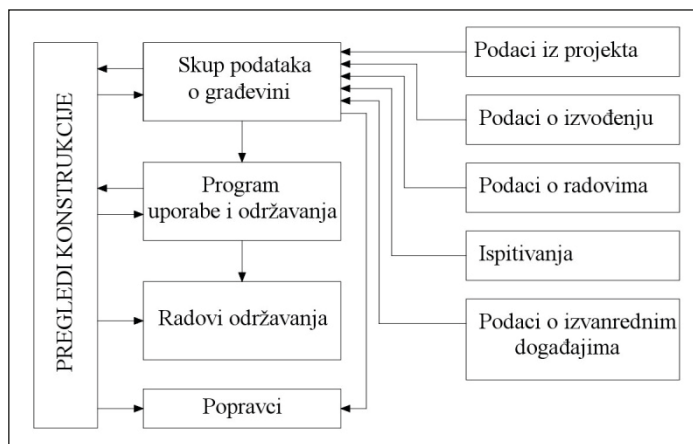
U procesu projektiranja projektant predviđa i procjenjuje ponašanje građevine od faze gradnje do faze korištenja, pri čemu se dokazivanje temelji na izravnim proračunskim metodama, dok usporedivo iskustvo koristi kao osobnu kontrolu izravnih proračunskih metoda. Općenito su za struku posebno zanimljivi podaci iz faze probnih opterećenja kao su što probno punjenje akumulacije, hidrostatička proba spremnika, probno opterećenje mosta, zbog toga što se probnim opterećenjima dokazuje uspješnost ponašanja građevine. Za neke vrste građevina propisima je određeno tehničko promatranje građevine tijekom gradnje i tijekom eksploatacije, no projektanti neovisno o tome prema svojoj procjeni i za neke druge građevine koji nisu obuhvaćeni propisima projektom propisuje praćenje ponašanja građevine. Norma Eurokod 7 uvodi pravilo da se za vrijeme praćenja ponašanja građevine kroz tehničko promatranje treba voditi zapisnik o stvarnom ponašanju konstrukcije radi prikupljanja podataka za bazu podataka usporedivoga iskustva.

Obzirom da je samo za neke građevine propisom ili projektom određeno tehničko promatranje, potrebno je analizirati te postupke tehničkih promatranja kako bi se za sve građevine ovisno o njihovoj vrsti odredio postupak praćenja ponašanja građevina.

Primjer građevina za koje su propisana tehnička promatranja su visoke brane. U Hrvatskoj su tehnička promatranja visokih brana uređena "Pravilnikom o tehničkom promatranju visokih brana" [3] koji određuje da se projektom tehničkog promatranja određuje način promatranja, mjerenja i drugih ispitivanja elemenata visoke brane kako bi se u svakom trenutku moglo utvrditi stanje visoke brane s temeljnim tлом (podloga i bokovi) te stanje akumulacije, i to u pogledu stabilnosti, vododrživosti i djelovanja kemijskih i drugih činilaca na koroziju i mehaničku otpornost materijala. Pravilnik postavlja samo općeniti zahtjev za tehničkim promatranjem. Projektanti moraju projektom tehničkog promatranja sami odrediti elemente, učestalost, metode i obradu rezultata praćenja ponašanja građevine. Nedostatak ovog pristupa je u tome što se rezultati tehničkih promatranja različitih visokih brana ne mogu izravno uspoređivati. U nekim drugim zemljama, gdje je nadzor nad visokim

branama obveza posebno ustrojjenih državnih tijela, propisi pružaju detaljno razrađene zahtjeve. U SAD-u je Ministarstvo domovinske sigurnosti propisalo savezne smjernice za sigurnost brana [5]. Između ostalog, tim smjernicama su propisani službeni pregledi koje provode stručni timovi pod vodstvom ovlaštenih inženjera s velikim iskustvom u istraživanju, projektiranju, izgradnji i eksploataciji brana. U Novom Zelandu strukovno udruženje za visoke brane propisalo je smjernice za sigurnost brana [6] kojima se određuju vrste pregleda i matrica odgovornosti, a neovisna stručna osoba izdaje potvrdu o sukladnosti kojom se potvrđuje da se korištenje brane provodi na siguran način. U oba slučaja mogu se očekivati izravno usporedivi podaci s različitih građevina.

Vlasnici i upravitelji građevine zakonski su obvezni održavati građevinu sigurnom, a njihov je interes da građevina zadovoljava namjenu sa što manjim troškovima održavanja. Stoga se bez obzira na zakonske obveze dobro “gospodarenje građevinama” postiže tehničkim promatranjem kroz redovne i izvanredne preglede. Značajno unapređenje sustava gospodarenje građevinama postiže se ustrojem baze podataka o građevini, [7], primjer baze na slici 1.



Slika 1. Struktura baze podataka o građevini u službi “gospodarenja građevinom”

Jedna od najvažnijih zadaća tehničkog promatranja u funkciji održavanja je uočavanje oštećenja građevine. Stoga se projektom tehničkog promatranja treba odrediti sustav vrednovanja oštećenja te propisati popravne i zaštitne mjere za otklanjanje i sprječavanje oštećenja. Britansko ministarstvo transporta koristi sustav vrednovanja oštećenja s obzirom na veličinu i karakter oštećenja [5, 8]. Koliko god su oštećenja nepoželjna pojava, za projektante ona predstavljaju mogući izvor novih spoznaja jer nastaju uslijed prekoračenja kapaciteta

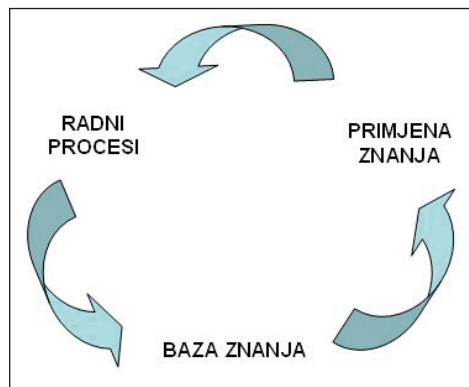
konstrukcije ili pojedinog elementa. Ukratko, ako nema oštećenja, odnosno, deformacije su u dopuštenim granicama, onda su projekt, izvedba i održavanje građevine dobri. Ako su se pojavila oštećenja, onda kod projektiranja, izvedbe i održavanja nove usporedive građevine treba analizirati oštećenja i prema potrebi povećati dimenzije ili odabrati kvalitetniji materijal.

3. Informacijski sustav upravljanja dokumentacijom

Dokumentirani podaci o građevinama, projektna i izvođačka dokumentacija te izvješća o tehničkom promatranju nalaze se u različitim arhivama koje se razlikuju prema dostupnosti dokumenta i stupnju informatizacije, ovisno o potrebama osnivatelja arhiva.

Za primjenu usporedivog iskustva projektantu je potreban pouzdan i brz pregled osnovnih podataka o postojećim građevinama te informacija o smještaju relevantne dokumentacije. Nakon odabira usporedivih postojećih građevina s građevinom koja se projektira, nužno je osigurati ponovljivost cijelog procesa u smislu dostupnosti dokumenata korištenih pri projektiranju korištenjem usporedivog iskustva, npr. revidentu pri kontroli projekta. Navedeni zahtjevi rada traže uspostavu informacijskog sustava upravljanja dokumentacijom baze podataka usporedivog iskustva.

Baza podataka usporedivog iskustva trebala bi biti izrađena kao interaktivna baza znanja koja omogućuje svoju stalnu nadopunu, korekciju i nadgradnju ugrađenog znanja. Baza podataka usporedivog iskustva trebala bi služiti primjeni stečenih saznanja o ponašanju građevina u radnim procesima projektiranja i održavanja građevina, a pojedinačna saznanja iz radnih procesa trebala bi nadopunjavati bazu (Slika 2). Primjena računalno podržanog informacijskog sustava omogućuje ubrzanje radnih procesa te osigurava njihovu pouzdanost i ponovljivost.



Slika 2. Proces upravljanja znanjem

4. Baza podataka građevina

Izradu baze podataka usporedivog iskustva najlakše je započeti bazom podataka za jednostavne građevine, a nakon njene verifikacije i validacije bazu podataka treba proširiti i za složene građevine.

Temeljem analize zahtjeva projektiranja korištenjem usporedivog iskustva i analize raspoloživih podataka za jednostavne građevine prve geotehničke kategorije na području Poreča izrađena je baza podataka [4] korištenjem programa MS Access 2002 [9]. Baza podataka je strukturirana na način da su povezani statički podaci s dinamičkim podacima o građevinama koji se dobivaju pregledom odnosno tehničkim promatranjem građevine. Također, za svaku građevinu popisana je relevantna dokumentacija s podatkom o arhivi u kojoj se nalazi dokumentacija. Pristup i rad s bazom podataka omogućen je izradom aplikacije koja pruža niz obrazaca za unos i pregled podataka. Aplikacija također nudi i niz izvješća o rezultatima pretraživanja prema kriterijima zadanim upitom korisnika.

Nakon izrade baze podataka slijedilo je prikupljanje relevantnih podataka o građevinama. Obradena je tehnička dokumentacija smještena u arhivima tijela državne uprave i projektnih ureda te obavljen pregled građevine na terenu. Relevantni podaci o građevini dobiveni su čitanjem tehničkih opisa i rješenja o građevinskim i uporabnim dozvolama, pregledom nacрта, te uvidom u stanje građevine, s fotografiranjem i pisanjem izvješća o tehničkom promatranju. Za obrađene građevine nije propisana obveza tehničkog promatranja, tako da je jedini dostupan dokumentirani pregled stanja građevine onaj nastao izradom baze. Nakon prikupljanja relevantnih podataka o građevini isti su uneseni u bazu kroz priređene obrasce.

Glavno sučelje aplikacije (Slika 3) omogućuje uređivanje i brisanje podataka o postojećim građevinama, unos podataka o novoj građevini te pretraživanje građevina po lokaciji, dokumentaciji, opterećenju temelja građevine i vrsti građevine.

4.1. *Statički podaci o građevini*

Statički podaci o građevini su oni podaci koji se u vremenu ne mijenjaju. To su lokacija građevine, visina, katnost, godina projektiranja i naziv projektanta (Slika 4). Za svaku su građevinu posebno opisane temeljna konstrukcija (Slika 5), nadtemeljna konstrukcija i krovna konstrukcija. Podjela građevine na konstruktivne dijelove omogućuje pretraživanje i usporedbu različitih građevina, npr. prema kriteriju usporedivih dimenzija temelja, što je bitno za projektiranje korištenjem usporedivog iskustva.

Baza podataka građevina

BAZA PODATAKA GRAĐEVINA REPUBLIKE HRVATSKE

Građevina ID: 1273953159 TRAŽILICA: Upiši traženi ID:

Otvori građevinu
Nova građevina
Uređivanje građevine
Brisanje građevine

Detaljna pretraga:
 po lokaciji
 po dokumentaciji
 po oprećenju
 po vrsti

KRAJ

ID	k.o.	k.č.	Ulica	Naselje	Grad	Županija
▶ 1273953159	Kaštelir	3128/1		Kaštelir	Poreč	Istarska
2011567240	Kaštelir	3128/3		Kaštelir	Poreč	Istarska
1273957678	Kaštelir	3128/4		Kaštelir	Poreč	Istarska
324775692	Vrvari	290/6	Piantade 14	Vrvari	Poreč	Istarska
1198313926	Funtana	890/3		Funtana	Poreč	Istarska
1274019098	Funtana	539/12		Funtana	Poreč	Istarska
767927690	Musoba	779/19		Musoba	Poreč	Istarska

19.6.2010 13:26:23

Slika 3. Prikaz glavnog sučelja aplikacije

Podaci o građevini

PODACI O GRAĐEVINI ID: 324775692

LOKACIJA:

Županija: Istarska Katastarska općina: Vrvari
 Grad: Poreč Katastarska čestica: 290/6
 Naselje: Vrvari
 Ulica: Piantade 14

OPĆI PODACI:

Vrsta: Slobodnostojeća Slika: C:\Fotodokumentacija\
 Visina (m): 3,10 Katnost: P
 Broj st. jed.: 1 Podrum:

Projektant: Patricia Jugovac-Kos, dipl.inj.
 Godina: 2008

Dokumentacija
 Temeljna konstrukcija
 Nadtemeljna konstrukcija
 Krovna konstrukcija

Pregled građevine
 Izlaz

Slika 4. Prikaz obrasca podataka o građevini

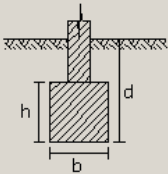
Podaci o građevini: Temeljna konstrukcija

~ TEMELJNA KONSTRUKCIJA ~

GradjevinarID: 1273957678

Vrsta temelja: Temeljna traka
 Klasa betona: C16/20
 Vrsta tla: raspucala stijena

DIMENZIJE:
 Širina (b): 0,50 m
 Visina (h): 0,60 m
 Dubina (d): 0,80 m
 Površina temelja: 41,93 m²
 Odnos Temelj/Objekt: 0,33



Procjena opterećenja
 Stalno: 42,62 kN/m
 Pokretno: 4,5 kN/m

Procjena opterećenja na temelj
 Stalno: 85,24 kN/m²
 Pokretno: 9 kN/m²

Izlaz

Calculating . . . FLTR NUM

Slika 5. Prikaz obrasca podataka o temeljnoj konstrukciji

4.2. Dinamički podaci o građevini - Pregled građevine

Dinamički podaci o građevini dobivaju se pregledima, odnosno tehničkim promatranjem građevine. Svaki pregled je opisan nadnevkom, vrstom pregleda, izvršiteljem pregleda te nizom podataka o stanju pojedinih konstruktivnih dijelova građevine s naglaskom na uočavanju deformacija i oštećenja (Slika 6).

Pregled građevine

PREGLEDI GRAĐEVINE ID 1273953159

Pregled ID: 23

Pregled temeljne konstrukcije
 Pregled nadtemeljne konstrukcije
 Pregled krovne konstrukcije

Pregled ID	Vrsta pregleda	Datum pregleda	Izvršitelj:
23	redovni	25.9.2006	Ivan Ivanović
24	sezonski	30.5.2008	Josip Flavius
25	redovni	14.2.2008	John Lock

* AutoNumber
 Record: 1 of 3

Snimi Briši Izlaz

Slika 6. Prikaz obrasca evidencije pregleda građevine

Primjer pregleda temeljne konstrukcije pruža Slika 7.

Uvjet	Ocjena stanja
<input checked="" type="checkbox"/> Slijeganje temelja: Nije zapaženo slijeganje	dobro
<input checked="" type="checkbox"/> Prisutnost klizišta: nema klizišta	dobro
<input checked="" type="checkbox"/> Miniranje u neposrednoj blizini: U susjedstvu naknadno izvedena kuća s podrumom	dobro
<input checked="" type="checkbox"/> Erozija tla: nema erozije tla	dobro
<input checked="" type="checkbox"/> Promjena razine podzemne vode: Nije bilo promjene RPV-a	dobro
<input checked="" type="checkbox"/> Pukotine u pločniku: Pukotine iznad kanalizacije	loše
<input checked="" type="checkbox"/> Korjenje raslinja: neme drveća u blizini temelja	dobro
<input checked="" type="checkbox"/> Reviziona okna: suha	dobro
<input checked="" type="checkbox"/> Vлага u podrumu: nema vlage	dobro

Slika 7. Prikaz obrasca evidencije pregleda temeljne konstrukcije

4.3. Primjena usporedivog iskustva korištenjem baze podataka o građevinama

Izrađena baza podataka, ovisno o potrebama upravitelja i vlasnika, može služiti za pohranu i korištenje saznanja o pojedinoj građevini za potrebe održavanja građevine. No, osnovna namjena izrađene baze podataka je bila omogućiti brzo, pouzdano i ponovljivo pretraživanje usporedivih postojećih građevina s građevinom koja se projektira, odnosno omogućiti korištenje usporedivog iskustva u projektiranju. Izrađena baza podataka omogućuje pretraživanje građevina po lokaciji, dokumentaciji, opterećenju temelja građevine i vrsti građevine. Primjer pretraživanja građevina po lokaciji provodi se na način da se za promatranu građevinu (postojeću ili onu koja se projektira) upiše radijus i kao rezultat pretrage dobiva popis građevina s osnovnim podacima koji se nalaze unutar tog radijusa (Slika 8). Daljnjim pretraživanjem pojedinih izabranih građevina dobivaju se ostali podaci o izabranoj građevini,

kao što su popis tehničke dokumentacije o građevini s podacima o mjestu njihova arhiviranja. Time se projektant upućuje gdje treba potražiti geotehnički elaborat, projekt temeljenja i slično kako bi odredio uvjete tla i uvjete temeljenja nove građevine pomoću usporedivog iskustva. Osim toga, projektantu je omogućeno da uvidom u statičke i dinamičke podatke o pojedinim dijelovima konstrukcije građevine trenutno dobije podatke kao što su dimenzije temelja, vrsta temeljnog tla (Slika 5), slijeganje temelja (Slika 7) i dr.

Ostale vrste pretraživanja po dokumentaciji, opterećenju temelja građevine i vrsti građevine uređene su na sličan način.

	GradjevinID:	KO:	KC:	Ulica:	Naselje:	Grad:	X:	Y:
▶	324775692	Vrvari	290/6	Piantade 14	Vrvari	Poreč	275.316,43	5.013.420,18
	1286906545	Vrvari	251/1		Vrvari	Poreč	275.205,00	5.013.390,00
*	(AutoNumber)						0,00	0,00

Slika 8. Prikaz rezultata pretraživanja građevine prema kriteriju lokaciji

5. Razvoj, uspostava, rad i održavanje baze usporedivog iskustva

Postojeće građevine nalaze se u stvarnim uvjetima okoliša i podvrgnute su stvarnim opterećenjima. Stoga je poznavanje njihovog ponašanja pri izvedbi i eksploataciji izrazito vrijedno za struku u smislu poboljšanja i unapređenja projektiranja, izvedbe, korištenja i održavanja građevina. Samo dokumentirani podaci o ponašanju postojećih građevina mogu se izravno koristiti u projektiranju prema zahtjevima norme Eurokod 7. Normom je posebno prepoznata važnost podataka koji se kontinuirano prikupljaju kroz tehničko promatranje jer ti podaci nadopunjavaju saznanja o ponašanju pojedine građevine.

Dokumentirani podaci o građevinama nalaze se u različitim arhivima koje se razlikuju prema dostupnosti dokumenata i stupnju informatizacije, ovisno o potrebama osnivatelja arhiva. Potrebe osnivatelja arhiva razlikuju se od potreba projekatanta. Projektantima je potrebno brzo i pouzdano pretraživanje postojećih građevina prema upitima koji se odnose na lokaciju građevine koja se projektira, uvjetima u tlu, namjeni građevine i vrsti konstrukcije. Ostvarivo i racionalno rješenje je da se iskoristi sustav postojećih arhiva koje bi se povezale informatičkim sustavom i zajedno tvorile bazu podataka usporedivog iskustva (u daljnjem tekstu BUI ili baza usporedivog iskustva).

Dinamiku izrade baze usporedivog iskustva treba podijeliti u nekoliko faza. Temeljem analize postojećeg stanja arhiva i izrade modela baze podataka jednostavnih građevina [4], autori ovog rada daju prijedlog fazne izrade BUI-a (Tablica 1), s prijedlogom izvora financiranja za sve faze. Prijedlogom se pojedine faze izrade BUI-a raščlanjuju na korake. Za svaki korak pojedine faze dan je popis aktivnosti i određene su odgovornosti za provođenje pojedinih koraka (Tablica 2, Tablica 3, Tablica 4).

Tablica 1. *Prijedlog fazne izrade baze usporedivog iskustva – BUI-a*

Faza izrade	Naziv faze izrade	Izvori financiranja
F1	Razvoj BUI-a	Pretpristupni fondovi, znanstveni i tehnološki projekti, državni proračun, gospodarski subjekti
F2	Uspostava BUI-a	
F3	Rad i održavanje BUI-a	Naknade za usluge i državni proračun, gospodarski subjekti

Razvoj i uspostava BUI-a zahtjeva velika početna ulaganja, no može se očekivati da će se rad i održavanje BUI-a djelomično financirati kroz naknade za usluge. Iako je BUI prvenstveno namijenjena potrebama projektiranja, ona može služiti i potrebama gradnje i održavanja građevina. Stoga je potrebno već u prvom koraku faze F1 zainteresirati gospodarske subjekte i širu javnost za projekt BUI-a, širiti krug korisnika prepoznavanjem njihovih potreba i pravovremenim informacijama omogućiti njihovo uključivanje u projekt BUI-a.

Autori rada predlažu da za projekt BUI-a bude odgovorna Hrvatska komora inženjera građevinarstva i to izravno, kao osnivač povjerenstva za izradu BUI-a, te u kasnije kao nadzor nad radom povjerenstva i Ureda za rad BUI-a. Način financiranja rada povjerenstva i Ureda predložen je u Tablici 1. Odgovornost Komore proizlazi iz zakonske obveze koja obvezuje članove komore da se u projektiranju i nadzoru pridržavaju zakonske regulative [10], a tehničkim propisima je određeno da se u geotehničkom projektiranju primjenjuje norma Eurokod 7 [11, 12, 13, 14, 15].

Tablica 2. Koraci faze F1 – Razvoj baze usporedivog iskustva – BUI-a

Korak faze F1	Naziv koraka faze F1	Popis koraka faze F1	Odgovornost
F1K01	Povjerenstvo za izradu BUI	<ul style="list-style-type: none"> - informiranje šire javnosti o početku razvoja i uspostave BUI - izrada pravilnika povjerenstva za izradu BUI - poziv za sudjelovanje u povjerenstvu za izradu BUI - osnutak povjerenstva za izradu BUI koji je pod nadzorom Hrvatske komore inženjera građevinarstva 	Hrvatska komora inženjera građevinarstva
F1K02	Snimka postojećeg stanja dokumentacije	<ul style="list-style-type: none"> - analiza sadržaja i oblika projektne i izvođačke dokumentacije te izvješća o tehničkom promatranju - popisivanje postojećih relevantnih arhiva - analiza stanja postojećih relevantnih arhiva 	Povjerenstvo za izradu BUI
F1K03	Projektni zadatak za izradu BUI	<ul style="list-style-type: none"> - analiza snimke postojećeg stanja dokumentacije - analiza zahtjeva projektiranja usporedivim iskustvom - izrada prijedloga nužnog sadržaja i oblika projektne i izvođačke dokumentacije, te izvješća o tehničkom promatranju - izrada prijedloga organizacije arhiva kojom se treba osigurati dostupnost, pouzdanost i provjerljivost podataka, te povezivanje arhiva s BUI - određivanje formata i sadržaja atributa kojima se opisuju građevine (objekti) u BUI - izrada prijedloga konverzije postojećih podataka u skladu s formatom i sadržajem atributa kojima se opisuju građevine (objekti) u BUI - izrada obrasca Službenog izvješća BUI-a koje se izrađuje na upit stranke - određivanje minimalnih tehničkih zahtjeva BUI - određivanje odgovornosti i roka arhiviranja dokumenata - izrada projektnog zadatka za izradu BUI 	Povjerenstvo za izradu BUI
F1K04	Izrada varijantnih rješenja BUI	<ul style="list-style-type: none"> - poziv za izradu pilot projekta BUI prema projektnom zadatku za izradu BUI - organiziranje radnih sastanaka - prema potrebi izrada prijedloga izmjena i dopuna postojeće regulative, te izrada prijedloga nove regulative kojom se uređuje područje arhiviranja i korištenja dokumentacije o građevinama - poziv na javni uvid u varijantna rješenja BUI - odabir rješenja BUI 	Povjerenstvo za izradu BUI

Tablica 3. Koraci faze F2 - Uspostava baze usporedivog iskustva – BUI-a

Korak faze F2	Naziv koraka faze F2	Popis koraka faze F2	Odgovornost
F2K01	Ured za rad BUI	<ul style="list-style-type: none"> - izrada statuta i pravilnika o radu Ureda za rad BUI koja je pod nadzorom Hrvatske komore inženjera građevinarstva - osnivanje Ureda za rad BUI od strane Hrvatske komore inženjera građevinarstva - natječaj za rad u Uredu za rad BUI - odabir zaposlenika Ureda za rad BUI 	Povjerenstvo za izradu BUI
F2K02	Izrada strategije rada BUI	<ul style="list-style-type: none"> - određivanje prioriteta unosa podataka o građevinama ovisno o: - trenutnim potrebama građevinarstva, - potrebama investitora, - važnosti i značaju građevina. - povezivanje s kompatibilnim bazama podataka - suradnja s domaćim, stranim i međunarodnim stručnim i znanstvenim srodnim institucijama - eventualno sudjelovanje u znanstvenim i tehnološkim projektima - prema potrebi izrada prijedloga izmjena i dopuna postojeće regulative, te izrada prijedloga nove regulative kojom se uređuje područje arhiviranja i korištenja dokumentacije o građevinama 	Ured za rad BUI
F2K03	Probni rad BUI	<ul style="list-style-type: none"> - konverzija postojećih podataka i unos novih podataka u skladu s formatom i sadržajem atributa kojima se opisuju građevine (objekti) u BUI prema prioritetima određenim strategijom rada BUI - informiranje javnosti o početku rada i uslugama koje pruža Ured - poziv korisnicima na iskazivanje zadovoljstva i primjedbi na dobivene usluge - analiza sadržaja i oblika službenog izvješća BUI-a koje se izrađuje na upit stranke - eventualna izmjena sadržaja i oblika službenog izvješća BUI-a koje se izrađuje na upit stranke - analiza probnog rada i izrada godišnjeg plana rada 	Ured za rad BUI

Tablica 4. Koraci faze F3 - Rad i održavanje baze usporedivog iskustva – BUI-a

Korak faze F3	Naziv koraka faze F3	Popis koraka faze F3	Odgovornost
F3K01	Redovni rad BUI	<ul style="list-style-type: none"> - provođenje poslovne politike određene strategijom rada i godišnjim planovima - stalno poboljšanje rada - proširenje BUI novim temama (npr. održavanje građevina) - pronalaženje novih korisnika (npr. osiguravajućih kuća) i razvoj novih usluga - osiguranje financiranja 	Ured za rad BUI
F3K02	Održavanje BUI	<ul style="list-style-type: none"> - nadzor nad radom arhiva u sustavu BUI - usklađivanje s regulativom i zahtjevima tržišta 	Ured za rad BUI

6. Zaključak

Normom Eurokod 7 dopušteno je da se u projektiranju pojedinih geotehničkih konstrukcija (npr. plitkih temelja) koristiti neizravna proračunska metoda uz pomoć usporedivog iskustva. Osim toga, Eurokod 7 postavlja pravilo da se projektni rezultati svih geotehničkih konstrukcija moraju provjeriti usporedivim iskustvom gdje god je to moguće te da se izbor karakterističnih vrijednosti geotehničkih parametara mora zasnivati na rezultatima i izvedenim vrijednostima iz laboratorijskih i terenskih ispitivanja, nadopunjenima dobro uspostavljenim iskustvom. Korištenje usporedivog iskustva u projektiranju geotehničkih konstrukcija pruža ekonomičniji i sigurniji projekt jer se mogu izostaviti pojedina ispitivanja kao što su probna polja za izvedbu nasipa, pilota i geotehničkih sidara. Ispitivanje nasipa nije potrebno provoditi za neke kombinacije materijala i postupaka zbijanja ako je postupak zbijanja dokazan pokusnim poljem ili usporedivim iskustvom. Pokusno opterećenje pilota ne mora se provesti ako se koristi ona vrsta pilota ili metoda ugradnje za koju postoji usporedivo iskustvo. U projektu sidrenja i određivanju izvedbe sidara smiju se upotrijebiti samo oni sustavi sidrenja koji su ispitani istraživanjem ili za koje postoji dokumentirano, uspješno usporedivo iskustvo obzirom na njihovo ponašanje i trajnost.

No, za primjenu usporedivog iskustva moraju se zadovoljiti zahtjevi koji proizlaze iz definicije usporedivog iskustva [1] koja glasi: *“usporedivo iskustvo su dokumentirani ili na koji drugi način jasno utvrđeni podaci o temeljnom tlu iz projekta, koji se odnose na iste vrste tla i stijene za koje se očekuje slično*

geotehničko ponašanje i na slične konstrukcije. Lokalno dobiveni podaci se smatraju posebno važnima.”

Iako definicijom nije izravno određeno, usporedivo iskustvo mora biti dokumentirano i arhivirano na način da se pristup dokumentima omogući projektantima, revidentima i tijelima uprave koje izdaju odgovarajuće dozvole jer pozivanjem projektanta na usporedivo iskustvo dokumenti, kao što su elaborati o istražnim radovima, postaju podloga projekta.

Primjena usporedivog iskustva nužno traži pozivanje na usporedive građevine temeljene u sličnim uvjetima za koje postoji pouzdana i provjerljiva barem projektna i izvođačka dokumentacija s ocjenom ponašanja građevine u eksploataciji. Za primjenu usporedivog iskustva prema zahtjevima Eurokoda 7 nužno je:

- propisati postupak prikupljanja, arhiviranja i upravljanja tehničkom dokumentacijom građevina,
- uspostaviti rad baze podatka usporedivog iskustva – BUI-a,
- izraditi službeni obrazac izvješća o pretraživanju BUI,
- zakonski urediti pitanja vlasništva i prava korištenja relevantnih podataka.

Dokumentirani podaci o građevinama nalaze se u različitim arhivama koje se razlikuju prema dostupnosti dokumenata i stupnju informatizacije, ovisno o potrebama osnivatelja arhiva koje se mogu razlikovati od potreba projektanata. Projektantima je potrebno brzo i pouzdano pretraživanje baze podataka o postojećim građevinama prema upitima koji se odnose na lokaciju građevine koja se projektira, uvjetima u tlu, namjeni građevine i vrsti konstrukcije. Ostvarivo i racionalno rješenje bilo bi iskoristiti sustav postojećih arhiva koje bi se povezale u informatički sustav i zajedno izgrađivale bazu podataka usporedivog iskustva.

Trenutno je obveza arhiviranja, odnosno čuvanja dokumentacije o građevinama vezena uz postojanje građevine, pri čemu nije riješeno pitanje vlasništva dokumentacije i prava korištenja dokumentacije. Rješenje problema može biti da se relevantna dokumentacija o građevinama proglasi javnim dobrom i kulturnom baštinom, s obavezom trajnog arhiviranja.

Rad s bazom usporedivog iskustva treba biti omogućen primjenom modernih tehnoloških rješenja koja se trebaju zasnivati na korištenju računalnih informacijskih sustava i interneta. Povezivanje internetom omogućuje jednostavno povezivanje teritorijalno rasprostranjenih arhiva i korisnika BUI-a.

Mogući oblici baze podatka usporedivog iskustva su decentralizirana poliformna baza podataka (povezane različite baze podataka) ili centralizirana uniformna baza podataka. Centralizirana uniformna baza podataka pruža veću

pouzdanost u odnosu na decentraliziranu poliformnu bazu podataka. Bez obzira na oblik baze podataka usporedivog iskustva, nakon njenog pokretanja nove podatke o građevinama trebalo bi unositi jednoobrazno. Kod odabira strukture baze podataka usporedivog iskustva trebalo bi analizirati postojeće primjenjive baze podatka i nove baze podatka namijenjene usporedivom iskustvu.

Dinamiku izrade baze usporedivog iskustva treba podijeliti u nekoliko faza te između ostalog predvidjeti izvore financiranja. Svaku pojedinu fazu izrade BUI-a treba raščlaniti na korake, s jasno određenim aktivnosti i odgovornostima za njihovo provođenje.

U konačnici, BUI treba služiti projektantu da pretraživanjem podataka o građevinama i lokacijama na pouzdan i provjerljiv način dobije odgovor postoji li usporedivo iskustvo s kojim bi mogao:

- koristiti neizravnu proračunsku metodu uz pomoć usporedivog iskustva u projektiranju pojedinih geotehničkih konstrukcija (npr. plitkih temelja),
- provjeriti projektne rezultate geotehničkih konstrukcija,
- nadopuniti rezultate izvedenim vrijednostima iz laboratorijskih i terenskih ispitivanja na kojima se zasniva izbor karakterističnih vrijednosti geotehničkih parametara,
- izostaviti pojedina ispitivanja kao što su probna polja za izvedbu nasipa, pilota i geotehničkih sidara.

Osim toga, BUI treba omogućiti kontinuirano prikupljanja podataka o stvarnom ponašanju konstrukcije za vrijeme tehničkog promatranja.

Baza usporedivog iskustva prvenstveno je namijenjena potrebama projektiranja. No, skup strukturiranih podataka koji se nalaze u baze može se obraditi na način da se dobiju odgovori na različite upite kao što su popis projekatana i izvođača pojedinih građevina ili popis oštećenja uzrokovanih slijeganjem. Takvi popisi mogu pomoći investitorima kod odabira projekatana i izvođača te kod procjene troškova odražavanja. Stoga je potrebno zainteresirati gospodarske subjekte i širu javnost za projekt BUI-a, širiti krug korisnika prepoznavanjem njihovih potreba i pravovremenim informacijama omogućiti njihovo uključivanje u projekt BUI-a.

7. Literatura

- [1] EN 1997-1:2004. *Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*. CEN, Bruxelles, 2004.
- [2] Narodne novine: *Zakonu o prostornom uređenju i gradnji (NN 76/07, 38/09, 55/11, 90/11)*, 2007

- [3] Službeni list SFRJ *Pravilnik o tehničkom promatranju visokih brana*, 1966
- [4] Milohanić N. *Primjena usporedivog iskustva u projektiranju geotehničkih konstrukcija* - magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2010.
- [5] FEMA. *Federal guidelines for dam safety*. U. S. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, 1979.
- [6] NZSOLD. *New Zealand Dam Safety Guidelines*. New Zealand Society on Large Dams, Wellington, 2000.
- [7] Radić, J. i suradnici: *Betonske konstrukcije – Priručnik*. Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Andris, Zagreb, 2006.
- [8] Department of Transport. *Bridge Inspection Guide*. HMSO, London, 1983.
- [9] Lauesen, S. *Microsoft-Access Tutorial*. Copenhagen, 2007.
- [10] Narodne novine: *Zakon o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji (NN 152/08, 49/11)*, 2008
- [11] Narodne novine: Tehnički propis za betonske konstrukcije (NN 139/09, 14/10, 125/10)
- [12] Narodne novine: *Tehnički propis za spregnute konstrukcije od čelika i betona (NN 119/09, 125/10)*, 2009
- [13] Narodne novine: *Tehnički propis za čelične konstrukcije (NN 112/08, 125/10)*, 2008
- [14] Narodne novine: *Tehnički propis za zidane konstrukcije (NN 01/07)*, 2007
- [15] Narodne novine: *Tehnički propis za drvene konstrukcije (NN 121/07, 58/09, 125/10)*, 2007

ARMIRANOBETONSKE OKVIRNE KONSTRUKCIJE U POTRESNIM PODRUČJIMA: USPOREDBA PRORAČUNA ZA SREDNJI I VISOKI RAZRED DUKTILNOSTI NA PRIMJERU PROJEKTA JAVNE GARAŽE U RIJECI

REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES IN SEISMIC REGIONS: MEDIUM AND HIGH CLASS DUCTILITY DESIGN COMPARISON FOR PARKING GARAGE IN RIJEKA

Viena Balen, Paulo Šćulac, Mehmed Čaušević

Sažetak. U ovome radu proveden je izračun armiranobetonske okvirne konstrukcije (javne garaže) u potresnim područjima prema europskim normama. Napravljena je usporedba dobivenih rezultata za srednji (DCM) i visoki razred duktilnosti konstrukcije (DCH). U radu su prikazana posebna pravila projektiranja za grede i stupove, ovisno o razredu duktilnosti, koja se odnose na proračunski primjer, kako je to definirano u europskoj normi EN 1998-1. Na temelju provedene analize može se zaključiti kako se ukupna količina armature za usvojeni srednji ili visoki razred duktilnosti konstrukcije bitno ne mijenja, ali se u slučaju usvajanja koncepta projektiranja s visokim razredom duktilnosti dobiva konstrukcija primjerenija izvedbi u seizmičkim područjima, što je i cilj europskih normi.

Ključne riječi: armiranobetonska okvirna konstrukcija, javna garaža, potres, razredi duktilnosti, europske norme

Abstract. Design of a reinforced concrete frame structure (a parking garage) in seismic regions in accordance with European Standards was carried out in this paper. A comparison of results was made for the ductility class medium (DCM) and ductility class high (DCH). Specific rules for beam and column design related to

the analysed example are provided, depending on the ductility classes, as defined in the European Standard EN 1998-1. Based on the analysis, it can be concluded that the total amount of reinforcement adopted for ductility class medium or high does not significantly differ. However, in case of adopting design concept with high ductility class, the designed structure is more suitable for construction in seismic regions, which is also the intention of the European Standards.

Key words: RC frame structure, parking garage, earthquake, ductility classes, European Standards

1. Uvod

Pri projektiranju konstrukcija u potresnim područjima duktilnost ima vrlo važnu ulogu. Duktilne se konstrukcije mogu proračunavati na umanjene inercijalne sile u odnosu na one sile dobivene za elastično ponašanje konstrukcije. To je moguće zbog svojstva duktilnih konstrukcija da pod cikličnim opterećenjem troše energiju na plastično deformiranje [1]. Duktilno ponašanje postiže se tako da se predvidi stvaranje plastičnih zglobova koji djeluju kao glavni element histereznog trošenja energije [2].

Europske norme za projektiranje konstrukcija u potresnim područjima EN 1998-1 [3] uvode pojam razreda duktilnosti konstrukcije.

Pri tome se kod armiranobetonskih zgrada, ovisno o njihovom histereznom kapacitetu trošenja energije, razlikuju dva razreda duktilnosti konstrukcije: srednji (DCM) i visoki (DCH). Kako bi se postigao odgovarajući stupanj duktilnosti, trebaju biti ispunjene posebne odredbe za sve konstrukcijske elemente (neke od njih su detaljnije obrađene u poglavlju 4) koje će omogućiti konstrukciji da razvije mehanizme u kojima će doći do trošenja histerezne energije uslijed cikličkog opterećenja, a da prije toga ne dođe do krhkog sloma.

Navedena dva razreda duktilnosti predstavljaju dvije različite moguće kombinacije čvrstoće i duktilnosti, približno jednake što se tiče ukupnih materijalnih troškova i postignute učinkovitosti, uslijed zadanog potresnog djelovanja [4]. Tako za slučaj srednjeg razreda dobivamo konstrukciju veće čvrstoće a manje duktilnosti, dok je kod visokog razreda obrnuto – manja čvrstoća, ali veća duktilnost.

Pri tome je kod srednjeg razreda duktilnosti sam postupak proračuna i izvedbe na gradilištu malo pojednostavljen u odnosu na visoki razred duktilnosti. U normi nije navedeno kada koristiti koji razred duktilnosti, niti su dana ograničenja primjene pojedinog razreda, već je to ostavljeno na izbor projektantu, ovisno o pojedinom projektu.

Ovom je normom dopušten i proračun za niski razred duktilnosti konstrukcije (DCL). Zgrade se za niski razred duktilnosti proračunavaju bez kapaciteta trošenja energije. U tom slučaju dovoljno je pridržavati se odredbi za proračun armiranobetonskih konstrukcija propisanih normom EN 1992-1 [5], pri čemu se potresno djelovanje jednostavno promatra na isti način kao i druga horizontalna djelovanja, poput primjerice vjetra, uz još neke dodatne odredbe iz EN 1998-1 [3]. Važno je istaknuti kako se niski razred duktilnosti preporučuje samo za područja s malom seizmičnošću koja su u pojedinoj državi definirana nacionalnim dodatkom.

U nastavku su prikazani rezultati analize jedne izvedene konstrukcije javne garaže, za koju je proračunom dobivena količina i raspored armature u nosivim elementima konstrukcije: gredama i stupovima, za srednji i visoki razred duktilnosti konstrukcije [6]. Cilj ovoga istraživanja je utvrditi mogućnost dobivanja ekonomičnije konstrukcije s manjom količinom ukupne armature u slučaju primjene koncepta visokog razreda duktilnosti.

2. Opis konstrukcije

Promatrana javna garaža klasična je armiranobetonska okvirna konstrukcija. U svakom smjeru konstrukciju ukružuju dva armiranobetonska zida debljine 20 cm (Slika 1, 2). Izvedena konstrukcija ima tri etaže čije visine iznose redom 3,0; 3,5 i 3,5 m, što daje ukupnu visinu konstrukcije od 10,0 m. Tlocrtne osne izmjere konstrukcije redom su: uzdužni rasponi 5,0; 7,0; 7,0; 7,0 i 4,5 m te poprečni rasponi 4,5; 6,0 i 4,5 m.

Izvedena je od betona razreda tlačne čvrstoće C25/30 te armirana šipkama od rebrastog čelika kvalitete B500B. Dimenzije nosivih elemenata iznose: grede 40/52 cm, stupovi 40/40 cm, dok su ploče debljine 20 cm. Konstrukcija je temeljena na čvrstoj stijeni (tlo razreda A).

Dodatno stalno opterećenje od slojeva poda uzeto je u iznosu od 1,5 kN/m², dok je za uporabno opterećenje garaže (prometno opterećenje) usvojena vrijednost od 3,5 kN/m².

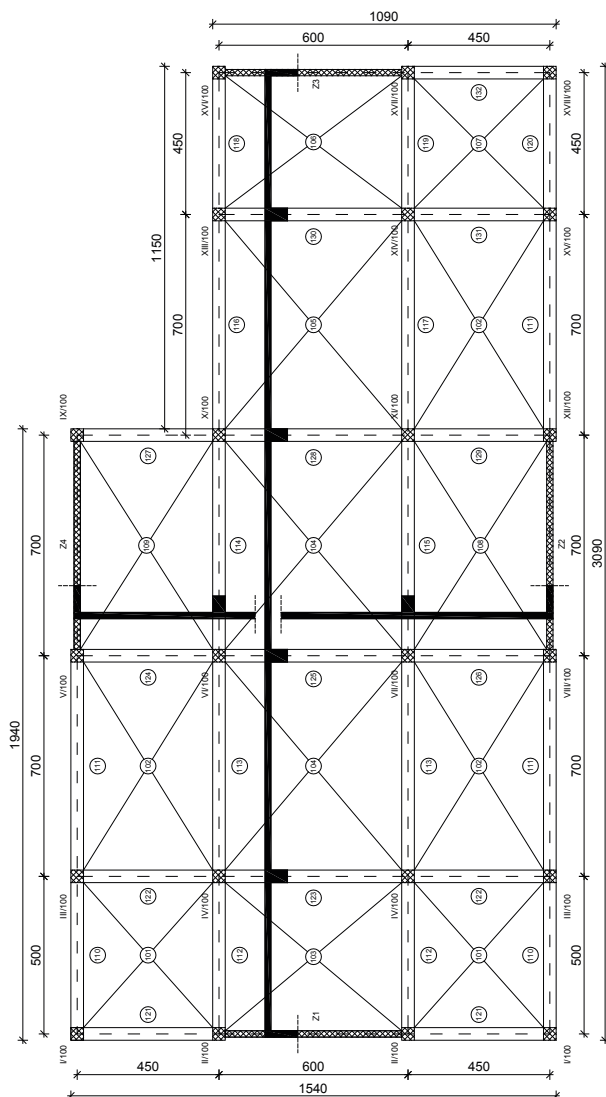
Analizirana građevina nalazi se u Rijeci, što odgovara VIII. području intenziteta potresa u stupnjevima ljestvice MSK-64.

Konstrukcija je izračunata na potresnu kombinaciju djelovanja. Proračun analizirane konstrukcije izvršen je primjenom programskog paketa TowerPro – 3D Model Builder 6.0 koji konstrukciju proračunava modalnim proračunom primjenom spektra odziva koji se primjenjuje bez ograničenja, tj. za sve konstrukcije kod kojih postoji utjecaj viših oblika vibracija na odziv konstrukcije [3].

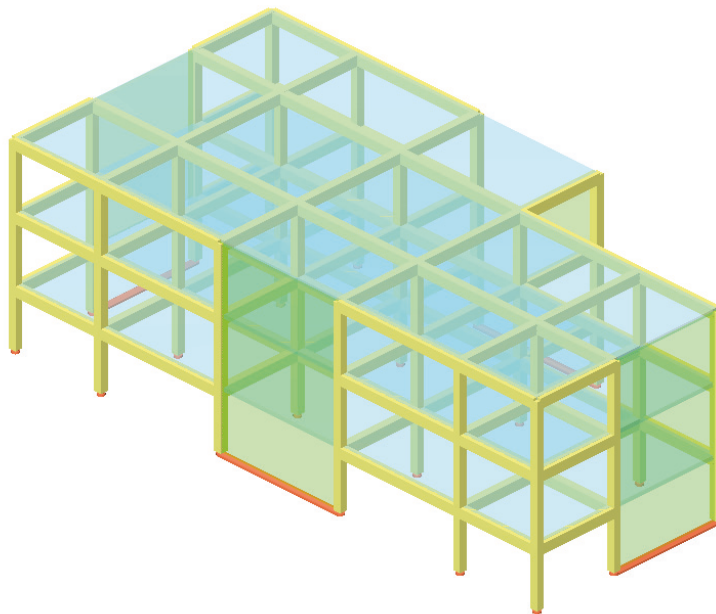
Za potrebe definiranja proračunskog spektra usvojena je vrijednost proračunskog ubrzanja u tlu razreda A a_g kao

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gr} = 1,0 \cdot 0,2g = 0,2g \quad (1)$$

gdje je γ_I faktor važnosti građevine (za garažu jednak 1,0), dok a_{gr} predstavlja poredbenu vrijednost maksimalnog ubrzanja tla razreda A koje za VIII. područje intenziteta potresa iznosi 0,2 g.



Slika 1. Tlocrt konstrukcije [6]



Slika 2. 3D prikaz konstrukcije [6]

U nastavku su dane vrijednosti prvih pet perioda osciliranja konstrukcije (Tablica 1). Efektivna modalna masa građevine koja će prilikom djelovanja potresa proizvoditi inercijalne sile na konstrukciju iznosi 15 096 kN [6].

Tablica 1. Dinamičke karakteristike proračunskog modela [6]

Oblik osciliranja	Period [s]	Frekvencija [1/s]
1	0,1722	5,8077
2	0,1443	6,9299
3	0,0946	10,5694
4	0,0798	12,5347
5	0,0655	15,2693

3. Definiranje potresnog opterećenja

3.1. Proračun faktora ponašanja q

Za definiranje projektnog spektra prema europskoj normi [3] potrebno je izračunati vrijednosti faktora ponašanja q , koji predstavlja sposobnost konstrukcije da apsorbira i troši energiju unesenu u konstrukciju u potresu. To se

trošenje energije ostvaruje nelinearnim ponašanjem konstrukcije, odnosno njenim oštećenjem na koje se računa pri radu s projektnim silama. Zapravo, faktor ponašanja predstavlja kvocijent između potresnih sila koje djeluju na konstrukciju kada je odziv konstrukcije elastičan i projektnih potresnih sila. Uvođenje faktora ponašanja čija je vrijednost veća od 1,5 i koja ovisi o vrsti konstrukcije, odnosno o načinu na koji ona prihvaća zadano opterećenje smatra se jednim od najvažnijih pojmova koji je uveden u europsku normu EN 1998-1 [3].

U promatranom slučaju, konstrukcija spada u dvojne sustave istovjetne okvirima, budući se radi o konstrukcijskom sustavu koji prenosi vertikalna djelovanja uglavnom prostornom okvirnom konstrukcijom, a otpornost takvog sustava na bočna djelovanja je osigurana djelomično okvirnom konstrukcijom, a djelomično vertikalnim zidovima, bez obzira da li su takvi zidovi međusobno povezani ili ne.

Faktor ponašanja q izračunava se prema izrazu:

$$q = q_o \cdot k_w \geq 1,5 \quad (2)$$

gdje je q_o osnovna vrijednost faktora ponašanja koja ovisi o vrsti konstruktivnog sustava i pravilnosti konstrukcije po visini (Tablica 2), dok je k_w koeficijent prevladavajućeg oblika sloma konstrukcijskih sustava sa zidovima (Tablica 3).

Tablica 2. Osnovne vrijednosti faktora ponašanja q_o za sustave pravilne po visini[3]

Vrsta konstrukcije	DCM	DCH
okvirni sustav dvojni sustav zidni sustav s povezanim zidovima	$3\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
zidni sustav s nepovezanim zidovima	3,0	$4\alpha_u/\alpha_1$
torzijski fleksibilan sustav	2,0	3,0
sustav obrnutog njihala	1,5	2,0

Za izračun osnovne vrijednosti faktora ponašanja q_o potrebno je odrediti faktor viška nosivosti konstrukcije koji predstavlja omjer parametara α_u i α_1 , koji su definirani kao:

α_1 je parametar kojim treba pomnožiti horizontalne projektne potresne sile da one dobiju takve vrijednosti za koje jedan najnepovoljnije opterećeni poprečni presjek konstrukcije dostigne svoje potpuno plastificiranje, dok

α_u predstavlja parametar kojim treba pomnožiti horizontalne projektne potresne sile da one dobiju takve vrijednosti za koje određen broj poprečnih presjeka dostigne svoje potpuno plastificiranje, pri čemu predmetna konstrukcija postaje kinematički labilan mehanizam.

Za višekratne višebrodne konstrukcije koje posjeduju pravilnost u tlocrtu, kao i za dvojne sustave istovjetne okvirima, preporuča se vrijednost faktora viška nosivosti konstrukcije u iznosu 1,3 [3].

Budući da analizirana konstrukcija nije pravilna u tlocrtu, kao omjer α_u / α_1 usvaja se srednja vrijednost od 1,0 i vrijednosti navedene kad je konstrukcija pravilna u tlocrtu:

$$\frac{\alpha_u}{\alpha_1} = \frac{1,3 + 1}{2} = 1,15. \quad (3)$$

Tablica 3. Vrijednosti faktora k_w [3]

Vrsta konstrukcije	k_w
Okvirni sustavi i njima istovrijedni dvojni sustavi	1,0
Zidni sustavi Sustavi istovrijedni zidnim sustavima Torzijski fleksibilni sustavi	$0,5 \leq (1 + \alpha_0) / 3 \leq 1,0$

Konačne vrijednosti faktora ponašanja za promatranu konstrukciju razlikuju se ovisno o razredu duktilnosti, pa tako za srednji razred duktilnosti faktor ponašanja iz jednadžbi (2) i (3) slijedi kao

$$q = (3 \cdot 1,15) \cdot 1 = 3,45; \quad (4)$$

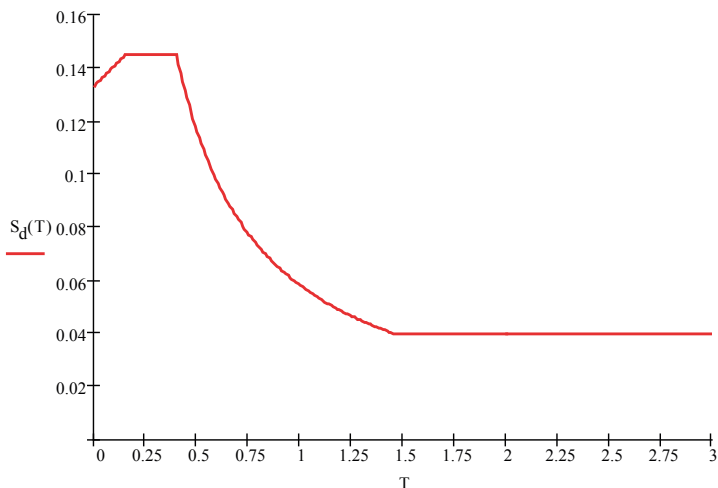
dok za visoki razred duktilnosti dobivamo

$$q = (4,5 \cdot 1,15) \cdot 1 = 5,75. \quad (5)$$

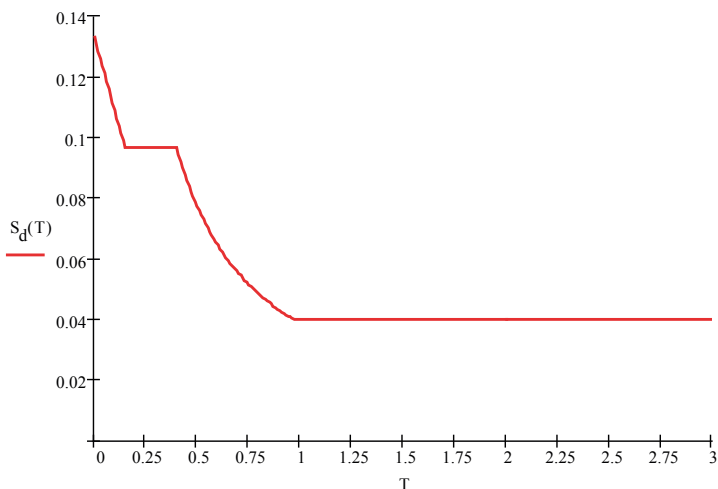
3.2. Spektri odziva ubrzanja podloge

Horizontalna potresna djelovanja predstavljena su s dvije međusobno okomite neovisne komponente koje su dane istim projektnim spektrima prikazanim na Slici 3 za srednji razred duktilnosti te na Slici 4 za visoki razred

duktilnosti. Na x osi nalaze se vrijednosti perioda osciliranja linearnog sustava s jednim stupnjem slobode T u sekundama, dok su na y osi vrijednosti projektne spektra $S_d(T)$ izraženog preko ubrzanja g .



Slika 3. Projektirani spekter za elastičnu analizu za DCM ($q=3,45$) [6]



Slika 4. Projektirani spekter za elastičnu analizu za DCH ($q=5,175$) [6]

4. Posebna pravila za grede i stupove u potresnim područjima primijenjena na promatranu konstrukciju

Pravila za grede i stupove u potresnim područjima prema EN 1998-1 [3] uključuju: geometrijska i materijalna ograničenja, pravila za proračun i provjeru proračunske nosivosti, proračun prema kapacitetu nosivosti, pravila lokalne duktilnosti, odredbe za čvorove greda-stup, pravila za sidrenje i nastavljanje armature, posebne dodatne mjere...

U okviru ovog rada, zbog opsežnosti nije moguće izložiti sva gore navedena pravila te će u nastavku biti prikazana samo pravila lokalne duktilnosti armiranobetonskih greda i stupova u potresnim područjima za DCM i DCH.

4.1. Posebna pravila za grede

Kritičnim područjem smatra se područje grede duljine l_{cr} mjereno od presjeka gdje se greda spaja sa stupom u čvoru te područje s obje strane bilo kojeg drugog presjeka koji se pri potresnoj kombinaciji djelovanja može plastično deformirati.

Duljina l_{cr} dana je za svaki razred duktilnosti u Tablici 4.

Tablica 4. Duljina kritičnog područja kod greda [3]

	DCM	DCH
Duljina kritičnog područja l_{cr}	$l_{cr} = h_w$	$l_{cr} = 1,5h_w$
h_w - visina grede		

Kako bi se zadovoljio zahtjev lokalne duktilnosti unutar kritične zone primarnih seizmičkih greda, vrijednost faktora duktilnosti izraženog preko zakrivljenosti μ_φ mora biti najmanje jednaka sljedećoj vrijednosti:

$$\mu_\varphi = 2q_0 - 1, \quad \text{ako je } T_1 \geq T_C$$

$$\mu_\varphi = 1 + 2(q_0 - 1)T_c/T_1, \quad \text{ako je } T_1 < T_C \quad (6)$$

gdje je T_1 osnovni period slobodnih oscilacija zgrade, dok je T_C period koji definira kraj područja konstantnog ubrzanja spektra.

Smatra se da je zadovoljen gore navedeni zahtjev lokalne duktilnosti, ako su unutar kritičnih područja grede primjenjene sljedeće dvije odredbe:

- u tlačno područje postavljena je uzdužna armatura koja nije manja od polovice količine stvarne vlačne armature, uz proračunsku potrebnu tlačnu armaturu,
- koeficijent armiranja vlačnom armaturom ρ ne prelazi vrijednost ρ_{\max}

$$\rho_{\max} = \rho' + \frac{0,0018}{\mu_{\varphi} \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}, \quad (7)$$

gdje je f_{cd} proračunska tlačna čvrstoća betona, $\varepsilon_{sy,d}$ proračunska vrijednost deformacije vlačne armature na granici popuštanja, f_{yd} proračunska granica popuštanja čelika za armiranje te ρ' koeficijent armiranja tlačnom armaturom.

Uzduž cijele grede koeficijent armiranja vlačnom armaturom ρ mora biti veći od najmanje vrijednosti ρ_{\min} koja je određena izrazom:

$$\rho_{\min} = 0,5 \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right), \quad (8)$$

gdje je f_{ctm} srednja vrijednost vlačne čvrstoće betona, a f_{yk} karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje.

Poprečna armatura u kritičnim područjima grede treba zadovoljiti odredbe dane u Tablici 5.

Tablica 5. Odredbe za poprečnu armaturu u kritičnom području grede [3]

	DCM	DCH
Najmanji promjer spona d_{bw}	6 mm	
Razmak spona s	$s = \min \left\{ \begin{array}{l} h_w / 4 \\ 24d_{bw} \\ 225 \text{ mm} \\ 8d_{bL} \end{array} \right\}$	$s = \min \left\{ \begin{array}{l} h_w / 4 \\ 24d_{bw} \\ 175 \text{ mm} \\ 6d_{bL} \end{array} \right\}$
	Udaljenost prve spona od rubnog presjeka grede treba biti manja od 50 mm.	
d_{bL} - najmanji promjer uzdužnih šipki armature		

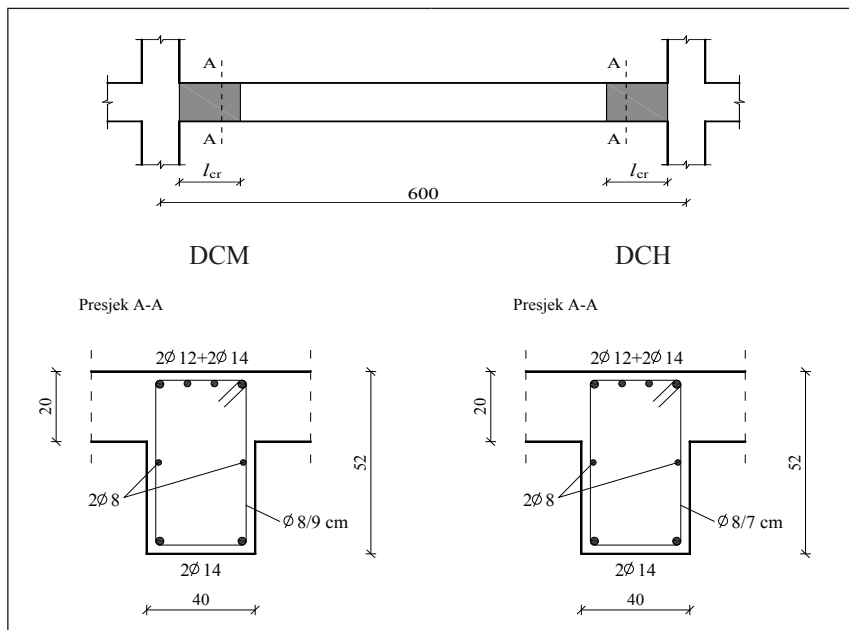
Posebne odredbe za DCH:

- najmanje 2 šipke promjera 14 mm trebaju biti postavljene po cijeloj duljini grede gore i dolje,
- četvrtinu najveće armature iz gornjeg područja presjeka na ležajevima treba postaviti uzduž cijele duljine grede.

U Tablici 6 i na Slici 5 prikazane su vrijednosti dobivene kada se opisana pravila za grede primijene na promatranu konstrukciju.

Tablica 6. Pravila za grede primijenjena na promatranu konstrukciju [6]

DCM	DCH
$l_{cr} = 52 \text{ cm} \approx 55 \text{ cm}$	$l_{cr} = 1,5 \cdot 52 \text{ cm} = 78 \text{ cm} \approx 80 \text{ cm}$
za $T_1 = 0,1722 \text{ s}$ i $T_c = 0,4 \text{ s}$	
$\mu_\phi = 12,38$	$\mu_\phi = 20,4$
za $\rho' = 0,00165$ i $\varepsilon_{sy,d} = 0,002174$	
$\rho_{\max} = 0,0042$	$\rho_{\max} = 0,0032$
$\rho_{\min} = 0,0026$	
$s = \min \left\{ \begin{array}{l} 520 / 4 = 130 \\ 24 \cdot 8 = 192 \\ 225 \\ 8 \cdot 12 = 96 \end{array} \right\} = 96 \text{ mm}$	$s = \min \left\{ \begin{array}{l} 520 / 4 = 130 \\ 24 \cdot 8 = 192 \\ 175 \\ 6 \cdot 12 = 72 \end{array} \right\} = 72 \text{ mm}$



Slika 5. Prikaz kritičnih područja grede za DCM i DCH [6]

4.2. Posebna pravila za stupove

Kritična su područja stupa područja na udaljenosti l_{cr} od kraja stupa (Tablica 7).

Tablica 7. Duljina kritičnog područja stupa [3]

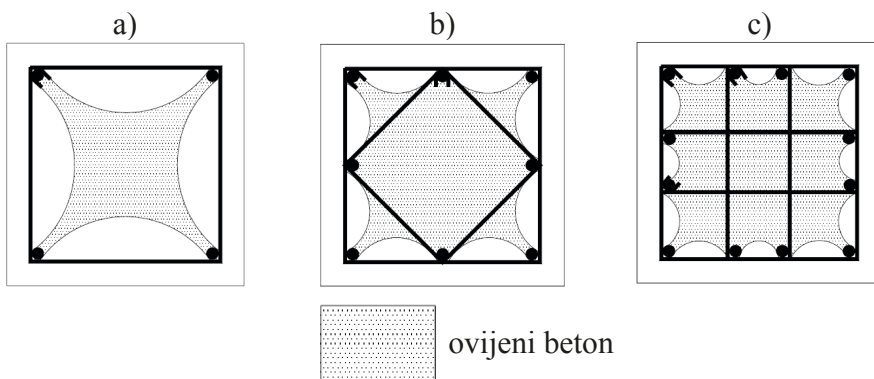
	DCM	DCH
Duljina kritičnog područja l_{cr}	$l_{cr} = \max \left\{ \begin{array}{l} h_c \\ l_{cl} / 6 \\ 45 \text{ cm} \end{array} \right\}$	$l_{cr} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5h_c \\ l_{cl} / 6 \\ 60 \text{ cm} \end{array} \right\}$
h_c - veća izmjera poprečnog presjeka stupa l_{cr} - svijetla duljina stupa		

Ukupni koeficijent armiranja uzdužne armature ρ_l ne smije biti manji od 0,01 niti veći od 0,04. Kod simetričnih poprečnih presjeka stupova potrebno je predvidjeti simetričnu armaturu ($\rho = \rho'$).

U cilju povećanja cjelovitosti čvora greda-stup treba predvidjeti najmanje jednu šipku između šipki u kutovima na svakoj stranici stupa.

Ako je $l_{cl} / h_c < 3$, čitava se visina stupa usvaja kao kritično područje.

Unutar kritične zone primarnih seizmičkih stupova, vrijednost faktora duktilnosti izraženog zakrivljenošću μ_ϕ mora biti najmanje jednaka vrijednosti navedenoj u (6).



Slika 6. Primjeri ovijanja kvadratnog poprečnog presjeka [7]. Najbolja ovijenost postiže se sponama prema c), a najslabija prema a)

Oblik spona u kritičnom području treba odabrati na način da se svojstva presjeka poboljšaju zbog troosnog stanja naprezanja prouzročenog ovijanjem sponama. Neki od primjera ovijanja kvadratnog poprečnog presjeka prikazani su na Slici 6.

Razmak spona treba biti najmanje jednak onome danom u Tablici 8 – time se osigurava minimalna duktilnost i sprečava lokalno izvijanje uzdužnih šipki.

Tablica 8. Odredbe za poprečnu armaturu u kritičnom području kod stupova [3]

	DCM	DCH
Promjer spona d_{bw}	$\geq 6 \text{ mm}$	$\geq 0,4 \cdot d_{bL,max} \cdot \sqrt{f_{ydL} / f_{ydw}}$
Razmak spona s u kritičnom području	$s = \min \left\{ \begin{array}{l} b_o / 2 \\ 175 \text{ mm} \\ 8d_{bL} \end{array} \right\}$	$s = \min \left\{ \begin{array}{l} b_o / 3 \\ 125 \text{ mm} \\ 6d_{bL} \end{array} \right\}$
Najveći razmak između susjednih uzdužnih šipki pridržanih sponama	200 mm	150 mm
f_{ydL} - proračunska granica popuštanja uzdužne armature f_{ydw} - proračunska granica popuštanja poprečne armature $d_{bL,max}$ - najveći promjer uzdužne armature b_o - najmanja izmjera betonske jezgre (unutar težišne linije vanjske spona)		

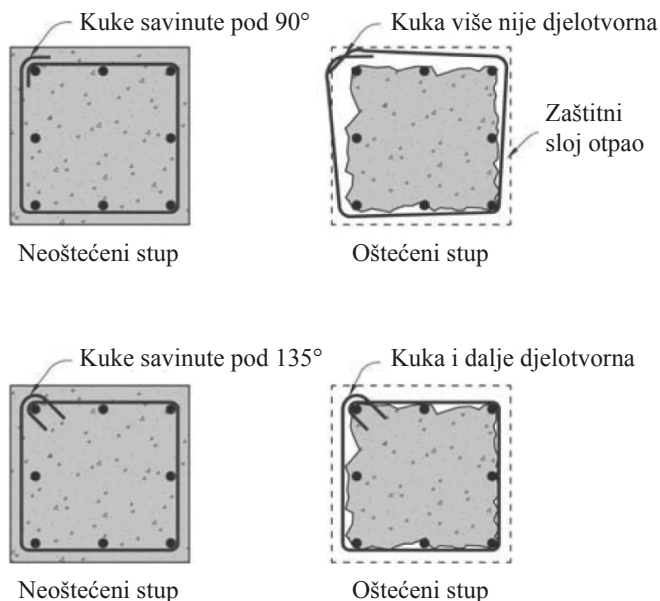
Dodatna pravila za DCH:

- u donja dva kata zgrade, iznad kritičnih područja treba postaviti spone, predviđene kao u kritičnom području, na dodatnoj duljini jednakoj polovici duljine kritičnih područja,
- količina uzdužne armature postavljena na dnu stupa najnižeg kata (tj. gdje je stup spojen s temeljem) ne treba biti manja od one na vrhu kata.

Spone koje se koriste kao poprečna armatura greda ili stupova trebaju biti zatvorene i završavati kukama savinutim pod 135° , duljine $10 d_{bw}$.

Uslijed cikličkog opterećenja, u potresu dolazi do otpadanja zaštitnog sloja betona nakon prekoračenja granice popuštanja armature te, ukoliko kuke nisu dobro usidrene u preostali beton, dolazi do njihovog izvlačenja.

Potresi su pokazali kako su kuke savinute pod 90° neučinkovite (Slika 7), jer se tijekom potresa otvaraju [8]

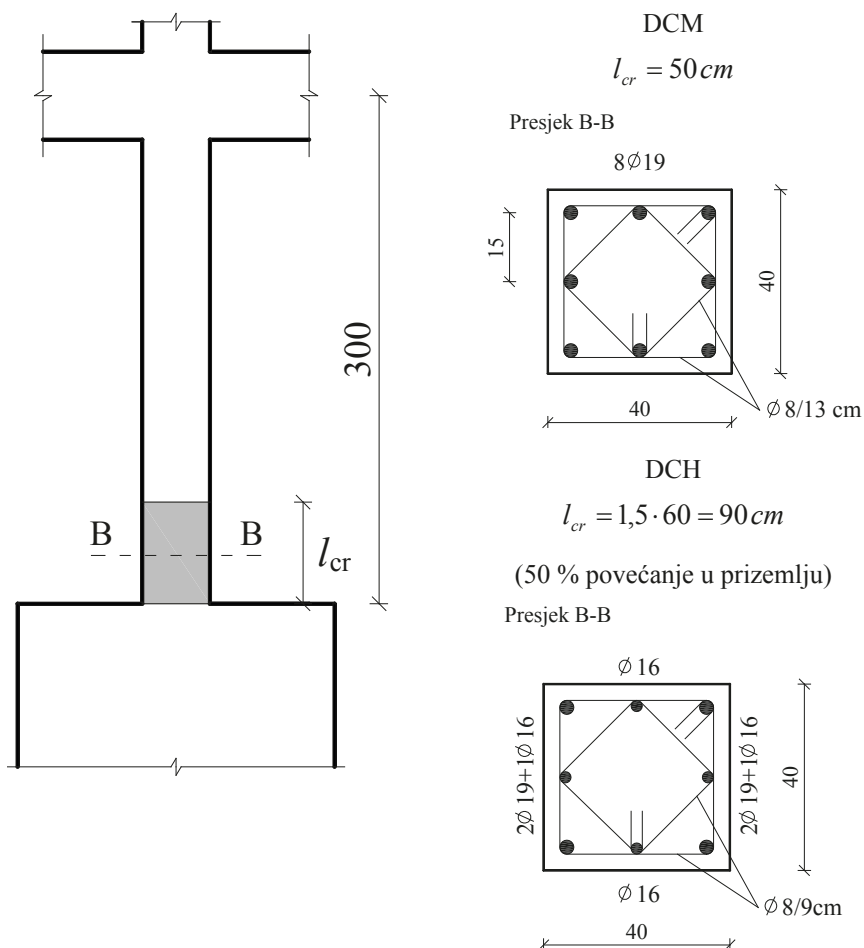


Slika 7. Usporedba učinkovitosti kuka savinutih pod 90° i 135° [8]

Tablica 9. Pravila za stupove primijenjena na promatranu konstrukciju [6]

DCM	DCH
$l_{cr} = \max \left\{ \begin{array}{l} 40 \\ 275/6 = 45,8 \\ 45 \end{array} \right\} \approx 50 \text{ cm}$	$l_{cr} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot 40 = 60 \\ 275/6 = 45,8 \\ 60 \end{array} \right\} = 60 \text{ cm}$
$l_{cl}/h_c = 275/40 = 6,9 > 3$	
$\mu_\varphi = 12,38$	$\mu_\varphi = 20,4$
$d_{bw} \geq 6 \text{ mm}$	$d_{bw} \geq 0,4 \cdot 19 \cdot \sqrt{434,8/434,8}$ $d_{bw} \geq 7,6 \text{ mm}$
za zaštitni sloj 3,5 cm i odabrani $d_{bw} = 8 \text{ mm} : b_o = 322 \text{ mm}$	
$s = \min \left\{ \begin{array}{l} 322/2 = 161 \\ 175 \\ 8 \cdot 19 = 152 \end{array} \right\} = 152 \text{ mm}$	$s = \min \left\{ \begin{array}{l} 322/3 = 107,3 \\ 125 \\ 6 \cdot 16 = 96 \end{array} \right\} = 96 \text{ mm}$

U Tablici 9 te na Slici 8 prikazane su vrijednosti dobivene kada se opisana pravila za stupove primijenjena na promatranu konstrukciju.



Slika 8. Prikaz kritičnog područja stupa za DCM i DCH [6]

Ovdje treba napomenuti kako se prema EN 1992-1-1 [5] za razmak spona s^* pri vrhu i podnožju stupa, na duljini jednakoj većoj dimenziji presjeka stupa, za DCM dobiva

$$s = \min \left\{ \begin{array}{l} 12d_{bL} = 12 \cdot 1,9 = 22,8 \text{ cm} \\ \text{manja dimenzija presjeka} = 40 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right\} = 22,8 \text{ cm} \approx 22 \text{ cm}$$

$$s^* = 0,6 \cdot s = 0,6 \cdot 22 \approx 13,0 \text{ cm}$$

što se ujedno usvaja kao mjerodavan razmak spona u kritičnom području.

5. Analiza rezultata proračuna

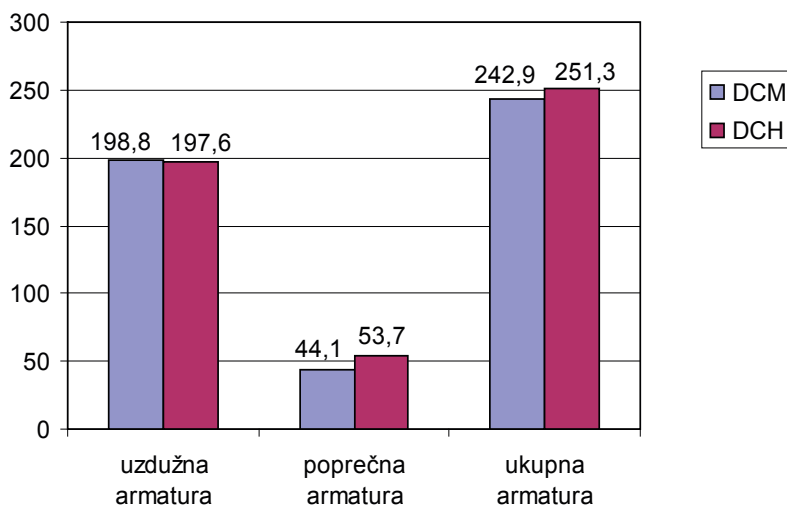
U ovom poglavlju prikazani su rezultati proračuna konstrukcije na temelju pravila iz EN 1998-1 [3].

Bitno je naznačiti da se kod analize za DCH očekuje smanjenje vrijednosti reznih sila u konstrukciji te, povezano s time, i smanjenje količine uzdužne armature u odnosu na DCM, ali se istovremeno kod DCH javlja povećanje duljine kritičnih područja te progušćivanje poprečne armature u kritičnim područjima primarnih seizmičkih greda i stupova, što rezultira povećanjem poprečne armature u odnosu na DCM [9].

Za potrebe ovoga rada analizirani su po jedna greda i stup za svaki razred duktilnosti konstrukcije.

5.1. Analiza dobivenih rezultata za gredu

Na Slici 9 prikazane su vrijednosti potrebne količine armature (u kg) dobivene za gredu za srednji i visoki razred duktilnosti.



Slika 9. Potrebna količina armature u gredi ovisno o razredu duktilnosti (kg) [6]

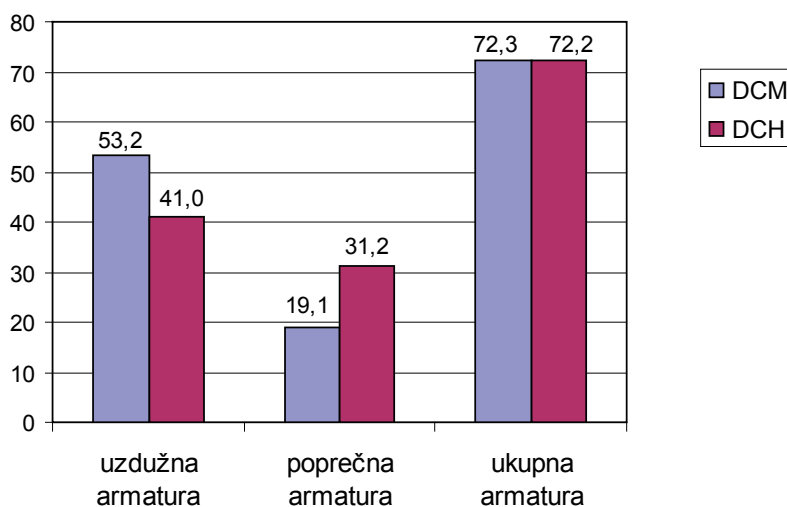
Analizom dobivenih podataka za gredu može se uočiti kako razlike u količini uzdužne armature, ovisno o tome radi li se o srednjem ili visokom razredu duktilnosti, gotovo da i nema, tj. zabilježen je neznan pad količine uzdužne armature za visoki u odnosu na srednji razred duktilnosti. U skladu s očekivanjima, poprečna armatura količinski bilježi rast kod visokog u odnosu

na srednji razred duktilnosti. Zbroji li se ukupna armatura, u slučaju grede može se zaključiti kako se za visoki razred duktilnosti dobiva zanemarivo veća količina armature u odnosu na srednji razred duktilnosti.

5.2. Analiza dobivenih rezultata za stup

Na Slici 10 uspoređene su potrebne količine armature (u kg) dobivene za stup za srednji i visoki razred duktilnosti.

Analizirajući rezultate dimenzioniranja stupa uočava se trend smanjenja količine uzdužne armature uz istovremeni porast poprečne armature za visoki u odnosu na srednji razred duktilnosti stupa, što je u skladu s očekivanjima. Promotri li se količina ukupne armature primjećuje se kako nema razlike u količini ovisno o razredima duktilnosti.



Slika 10. Potrebna količina armature u stupu ovisno o razredu duktilnosti (kg) [6]

6. Zaključak

Proračun konstrukcije na način da ona ostane u elastičnom području u slučaju velikog potresa neekonomičan je u većini slučajeva zato što su vrijednosti potresnih sila prevelike. Ekonomičniji proračun uključuje određeni stupanj oštećenja i korištenje duktilnosti konstrukcije kako bi se potresne sile smanjile do određene vrijednosti.

Proračunavamo li sile u u konstrukciji na osnovu duktilnog ponašanja, bitno je osigurati duktilan način sloma; u skladu s time, potrebno je pridržavati se posebnih pravila propisanih normom.

Analizom predmetne konstrukcije ukazalo se na trend promjene količine armature za srednji i visoki razred duktilnosti. Taj trend je sljedeći: količina uzdužne armature za visoki razred duktilnosti smanjuje se u odnosu na količinu uzdužne armature ako se usvoji srednji razred duktilnosti. Međutim, za zadovoljenje uvjeta lokalne duktilnosti za visoki razred duktilnosti potrebno je utrošiti više poprečne armature. Znači da se općenito može zaključiti kako se ukupna količina armature za usvojeni srednji ili visoki razred duktilnosti konstrukcije bitno ne mijenja, ali se u slučaju usvajanja koncepta projektiranja s visokim razredom duktilnosti dobiva konstrukcija primjerenija izvedbi u seizmičkim područjima, što je i cilj europskih normi. Ovaj rad ostavlja prostora za daljnja istraživanja na istu temu uzimajući kao predmet analize konstrukcije drugačijeg tipa i drugačijih karakteristika.

7. Literatura

- [1] Tomičić, I. *Betonske konstrukcije – odabrana poglavlja*. Zagreb, 1996.
- [2] Čaušević, M. *Dinamika konstrukcija – Potresno inženjerstvo, Aerodinamika, Konstrukcijske euronorme*. Golden marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2010.
- [3] Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN, Brussels, EN 1998-1: 2004.
- [4] *Designers' Guide to EN 1998-1 and EN 1998-5*, Thomas Telford Publishing, 2005.
- [5] Eurocode 2 – Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, EN 1992-1-1: 2004.
- [6] Balen, V. *Seizmički izračun armiranobetonske skeletne konstrukcije*, Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2010.
- [7] Foster, S.J. *Design and detailing of high strength concrete columns* (UNICV Report No. R375), The University of New South Wales, Australia, 1999.
- [8] Charleson A. *Seismic design for architects*. Elsevier, 2008.
- [9] Athanassiadou, C.J. Seismic performance of R/C plane frames irregular in elevation. *Engineering structures*, **30**: 1250-1261, 2007.

ANALIZA LUČNOG DRVENOG MOSTA POSEBNE KONSTRUKCIJE

ANALYSIS OF ARCHED GLULAM BRIDGE WITH SPECIAL STRUCTURAL SYSTEM

Daniel Kovačević*, Adriana Bjelanović**

***Sažetak.** Na primjeru drvenog mosta posebne lučne konstrukcije u radu je prikazan složeni postupak projektiranja koji uključuje i izbor optimalnog rješenja konstrukcije. Most je namijenjen prvenstveno pješačkom i biciklističkom prometu, dodatno ispunjava i zahtjeve prolaza interventnih vozila, a konstrukcijom i materijalom odlično se uklapa u okoliš. Kolnička konstrukcija spregnuta je lijepljenjem lameliranih poprečnih nosača i betonske ploče. Kao radna podloga poslužio je primjer vrlo poznatog i estetikom posebnog mosta "Ponte Lao" raspona 70m izvedenog u Nacionalnom parku Polino (Italija). O njemu dostupni podaci bili su ishodište za projekt replike mosta u okolini Rijeke. Proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti proveden je prema nadležnim Eurokodovima. Uključuje analize djelovanja, usporedne statičke i dinamičke analize priređenih FE modela te dimenzioniranje elemenata i karakterističnih detalja konstrukcije mosta. Poseban naglasak dat će se analizama stabilnosti mosta provedenim na dvije varijante rješenja, izvedenoj i predzavršnoj varijanti.*

***Ključne riječi:** lučni drveni most posebne konstrukcije, ovješena kolnička konstrukcija, analiza djelovanja, mehanička otpornost i stabilnost, statička i dinamička analiza.*

***Abstract.** This paper presents design procedure obtained on the example of timber arched bridges with special structural system. Special aesthetics together with sustainable material make an excellent featuring and fitting of the bridge into the environment. The bridge is primarily intended for pedestrian and cycle traffic and an occasional passing of service vehicles. Composite system made by*

* Rijekaprojekt Koning d.o.o., Moše Albaharija 10a, Rijeka
E-mail: daniel.kovacevic@rijekaprojekt-koning.com

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: adriana.bjelanovic@gradri.hr

gluing was used for the suspended road deck. Working ground is the “Lao River Bridge”, unique in its design, constructed in the National park Polino (Italy), with the span of 70m. The basic available information of that bridge was then applied to designing the same bridge in Rijeka surroundings. In accordance with EuroCodes, the design includes load analysis, static and dynamic analysis and the design of load-bearing system. Special attention will be paid to structural solutions analysis, carried out to fulfil stability requirements.

Key words: *arched timber bridge with special structural system, suspended road deck, load analysis, mechanical resistance and stability, static and dynamic analysis.*

1. Uvod

Mostovi su konstrukcije koje vjerojatno najviše obilježavaju krajobraz. Projektiranje mostova složen je i dugotrajan postupak koji uključuje razmatranje različitih arhitektonskih rješenja, usuglašavanje estetike mosta s temeljnim zahtjevima lokacije i namjene, izbor konstrukcijskog rješenja nedjeljiv od promišljanja tehnologije izvedbe i troškova te proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcije pri čemu treba ispuniti i zahtjeve vezane uz trajnost. Dojmljivost konstrukcije potaknula je i izradu diplomskoga rada u okviru kojeg su analizirane smjernice odabira pojedinih postupaka projektanata izvedene konstrukcije pri ostvarenju njene konačne verzije. Presentacija statičkih modela mosta, završne varijante (Model B) i predzavršne varijante, (Model A), ključna je za daljnje razumijevanje. Most je replika mosta preko rijeke Lao (Slika 1), izvedenog u Nacionalnom parku Polino (sjeverna Kalabrija). Sustav lučnog mosta s ovješanim kolnikom (Model A) odabran je kao rješenje prihvatljivo zbog mogućnosti temeljenja lukova u razini ceste kako se ne bi narušila konfiguracija terena zadiranjem u korito rijeke. Pojavili su se, međutim, problemi s bočnom nestabilnošću lukova karakteristični za ovaj tip mosta, a dodatan problem predstavljala je i vitkost kolničke ploče, 70m duge i prvotno široke tek 2,5m. Rezultat nastojanja projektanata izvedene konstrukcije da nađu prihvatljivo rješenje bilo je proširenje kolničke ploče i povećanje osnov razmaka lukova na 4,5m, do granica dopuštenih geometrijom temeljenja, te razmatranja dvaju modela (Model A i Model B). Analiza varijantnih rješenja i proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti za izvornu geometriju mosta prezentirani u ovom radu provedeni su za novu lokaciju u okolici Rijeke i za djelovanja karakteristična za to područje pri čemu su se također razmatrala oba modela. Kako model A nije udovoljio zahtjevima bočne stabilnosti, model B, kao završna varijanta mosta, sadrži nove elemente nosivog sustava povoljnog utjecaja na stabilnost. Oba modela priređena su u Staad.Pro računalnom paketu u kojem su glavni

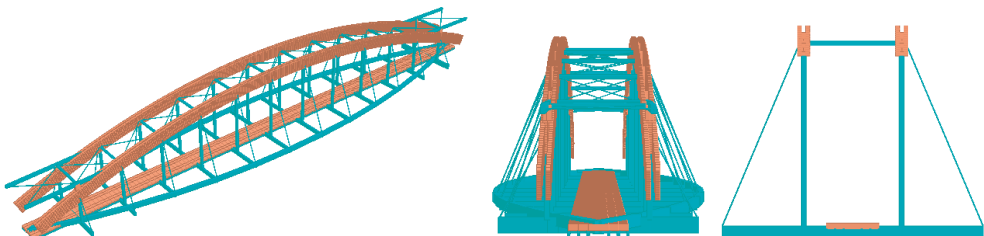
lučni nosači modelirani plošnim konačnim elementima (u nastavku KE), a lijepljenjem kruto spregnuta kolnička konstrukcija, modelirana je u kombinaciji plošnih (armiranobetonska ploča) i štapnih KE (lamelirane drvene gredice). Za sve ostale elemente nosivih sustava korišteni su štapni KE. Konstrukcija mosta projektirana je od homogenog lijepljenog lameliranog drva najvišeg razreda čvrstoće, GL36 (I. razred natprosječne nosivosti prema EN 1194 normi). Izbor posebnog razreda čvrstoće razumljiv je sa stajališta osiguranja dostatne otpornosti obzirom na izloženost konstrukcije (razred uporabe 3) i nepovoljan utjecaj okoline na svojstva materijala. Kao podloga u radu korišteni su informativni podaci o konstrukciji izvedenoga mosta i projektnim rješenjima koja su prethodila konačnom izboru nosivog sustava [1].



Slika 1. Radna podloga za projekt mosta – izvedeni most preko rijeke Lao [1]

1.1. Model A

Razvoj modela A rezultat je nastojanja da se poveća krutost kolničke konstrukcije. Rješenje je pronađeno u polaganju rešetke oblika leće koja se sastoji od para trozglobnih lukova položenih ispod kolnika i sekundarnih nosača dvodijelnog sastavljenog presjeka [1, 2]. Lećasta rešetka prenosi bočno horizontalno opterećenje s kolničke konstrukcije u betonske ležajeve što osigurava stabilnost mosta u smjeru okomitom na ravninu glavnih nosača.



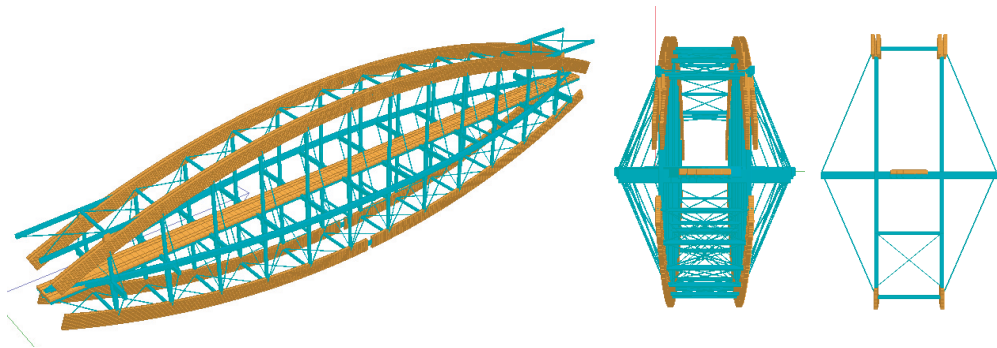
Slika 2. Aksonometrijski prikaz Modela A renderiranog u računalnom paketu Staad.Pro [2]

Kako bi se ekscentrično poprečno opterećenje vjetrom na trozglobne glavne lučne nosače razmaknuto sastavljenog presjeka (2x18/137,2cm) prenijelo na razinu kolničke konstrukcije, uvedene su čelične kose zatege koje povezuju lukove i lećaste pojaseve rešetke. Moment savijanja od bočnog vjetra time se rastavlja na par vertikalnih sila koje na rasteru od 4,5 m opterećuju vertikalne tlačne lukove (Slika 2), a bočno djelovanje vjetra usmjerava na spregove za stabilizaciju mosta u ravnini lukova i kolnika. Na dvodijelne sekundarne nosače rastera 463cm upušteno je 6 uzdužnih greda, preko njih je položena armiranobetonska ploča debljine 25cm (širine 264cm) modelirana kao kruto spregnuta lijepljenjem sa sekundarnim nosačima [1], [2]. Veza glavnih lukova i sekundarnih nosača su "vješaljke", vertikalni stupovi ovjesa kolničke konstrukcije na glavne lukove, postavljene na rasteru kosih čeličnih zatega koje povezuju glavne lukove i horizontalne lukove lećaste rešetke (Slika 1). Stabilizacija vertikalnih, prevladavajuće tlačnih glavnih lukova, riješena je spregom od drvenih greda i mekih čeličnih dijagonala. Konstrukcije ulaznih portala na krajevima sprega kojima se on produžuje do samih rubova raspona konstrukcije mosta zauzimaju izdignuti položaj omogućen konfiguracijom terena [1] te su time ispunjeni i zahtjevi nesmetane prometne komunikacije mostom (Slika 1). Veliki pomaci i rotacije mosta oko uzdužne osi pokazale su nedostatke modela što je u konačnici i dovelo do razvoja završnog modela.

1.2. Model B

Model je nadogradnja prethodnog modela i odabrano rješenje nosivog sustava. Identičnog je statičkog sustava gornjeg ustroja, pa zajednički elementi obaju modela tako zadržavaju funkciju pri preuzimanju opterećenja. Dodatak predstavlja donji ustroj, osmišljen kao protuteža gornjem i jamac stabilnosti mosta pri djelovanju bočnog vjetra koje se usmjerava ne samo na spregove u ravnini tlačnih lukova i kolnika (Model A), već i na spreg u ravnini vlačnih lukova. Poprečne ukrute između vlačnih lukova važne su pri montaži mosta i preuzimanju nesimetričnih opterećenja. Statički određen izvorni sustav postaje statički neodređen, što smanjuje deformabilnosti i povećava razinu sigurnosti [1]. Trozglobni vlačni lukovi donjeg ustroja jednodijelnog su presjeka 22/137,2cm, a sustav stabilizacijskog veza im prati os. Na vlačne lukove naliježu stupovi pridržani drvenim razuporama na približno polovici raspona stupova, na visini do koje je presjek konstantan (Slika 3). Razupore su dio vertikalnog stabilizacijskog veza formiranog među tlačnim stupovima s mekom čeličnom dijagonalnom ispunom (Slike 1 i 3). Veza vlačnih lukova i kolničke konstrukcije upotpunjena je kosim zategama na vrhu spojenim na horizontalne lukove lećaste rešetke (Slika 3). Povezivanje spregova jamstvo je stabilnosti

mosta i ravnomjerne preraspodjele sila u glavnim nosačima, što smanjuje globalnu koncentraciju naprezanja od horizontalnih djelovanja.

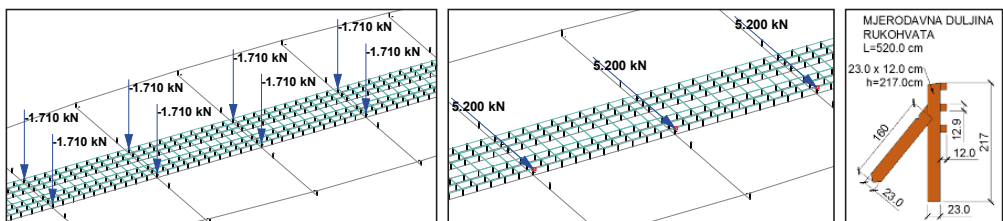


Slika 3. Aksonometrijski (renderirani) prikaz Modela B sa poprečnim presjekom konstrukcije [2]

2. Analiza djelovanja

2.1. Vlastita težina i stalno opterećenje

Opterećenje od vlastite težine naredbom je automatski uzeto u obzir kao vertikalno opterećenje u globalnom koordinatnom sustavu računalnog programa Staad.pro. Težina drvene ograde volumena $V = 0,45\text{m}^3$ u modelu nije definirana i zamjenjuje se vanjskom koncentriranom silom.

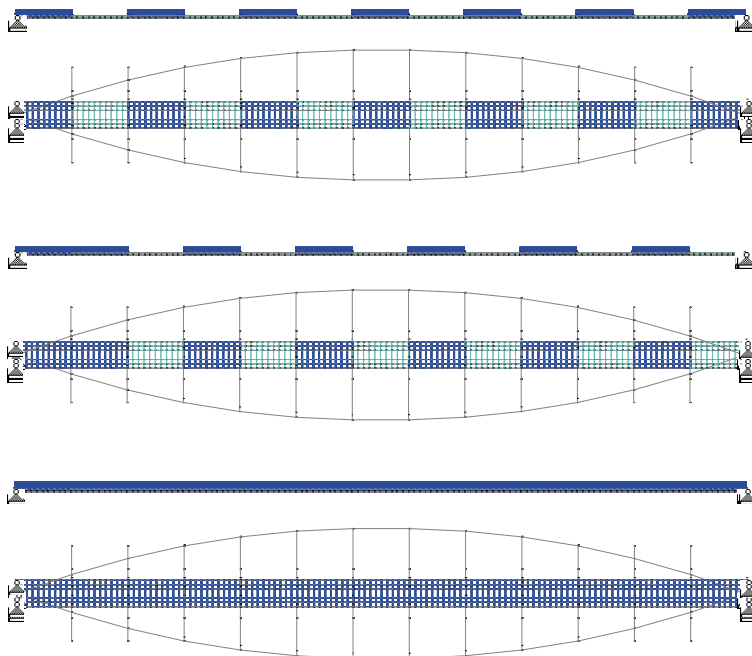


Slika 4. Modeli unosa vertikalnog opterećenja ogradom, FV, horizontalnog pritiska na rukohvat duljine 5,2m, FH = 1,0 kN/m, te prikaz presjeka ograde [2]

2.2. Opterećenje snijegom i prometno opterećenje

Opterećenje snijegom za pretpostavljenu lokaciju otvorenog mosta u zaleđu Rijeke nije mjerodavno za proračun, a model djelovanja detaljnije je objašnjen u [2], [3] i [4]. Prometno opterećenje modelirano je prema [4], a dinamički

učinci tretirani su kao statički. Učinci opterećenja pješacima i servisnog vozila modelirani su primjenom utjecajnih linija na tri neovisna modela, za jednoliko raspodijeljeno opterećenje od pješaka duž raspona kolnika, $q_{fk} = 3,23 \text{ kN/m}^2$ (Slika 5), karakteristične koncentrirane sile kotača Q_{fwk} i opterećenja od servisnog vozila, Q_{serv} . Priliv pješaka na cijelom rasponu konstrukcije kolnika duljine $L = 67,5\text{m}$ zaseban je model opterećenja ($q_{fk} = 5,0 \text{ kN/m}^2$).



Slika 5. Prikazi nekih od razmještaja opterećenja od pješaka za najnepovoljniju kombinaciju momenata savijanja u polju, nad ležajem i opterećenja prilivom ljudi [2]

Zbog male širine kolnika od svega 2,64m, najveće moguće opterećenje Q_{serv} može prouzročiti specijalno vatrogasno vozilo Multicar težine 4,8 t, odnosno 1,2 t po svakom kotaču. Za ukupno 13 polja i 12 unutrašnjih ležajeva moguće je provesti 25 kombinacija položaja vozila. Modeliranje prometnog opterećenja detaljnije je prikazano u [2]. Karakteristična vrijednost horizontalne sile Q_{fik} od prometnog opterećenja pješačkih mostova koja djeluje duž osi kolne ploče na visini njene površine (zajedno s vertikalnim prometnim opterećenjem) usvojena je kao 10%-tna vrijednost ukupnog opterećenja od zadanog jednoliko raspodijeljenog opterećenja, odnosno 60%-tna vrijednost ukupne težine vozila, pri čemu su obje vrijednosti zasebni slučajevi i međusobno se ne kombiniraju.

2.3. Opterećenje vjetrom

2.3.1. Osnovna i prosječna brzina vjetra

Djelovanje vjetra presudno je za ovu konstrukciju i moralo se razmotriti za oba modela (Model A i Model B). Analiza djelovanja provedena je prema normi EN 1991-1-4 za pretpostavljenu lokaciju mosta u zaleđu Rijeke (regija P7) i područje III. zemljovida RH, s referentnom brzinom vjetra $v_{b,0} = 35,0\text{m/s}$ koja je temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra, karakteristične 10-minutne prosječne brzina vjetra neovisne o smjeru [5] vjetra i godišnjem dobu, za visinu od 10m iznad otvorenog terena s niskom vegetacijom. Za pretpostavljenu nadmorsku visinu $a_s = 100\text{m}$, koeficijent nadmorske visine c_{alt} određen je prema sljedećem izrazu:

$$c_{alt} = 1 + 0,001 a_s = 1,1. \quad (1)$$

Osnovna brzina vjetra v_b , određena je sljedećim izrazom i jediničnim vrijednostima koeficijenta smjera vjetra, c_{dir} i koeficijenta ovisnog o godišnjem dobu, c_{season} .

$$v_b = c_{dir} c_{season} c_{alt} v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,1 \cdot 35,0 = 38,5 \text{ m/s}. \quad (2)$$

Prosječna brzina vjetra $v_m(z)$ na visini z iznad terena ovisi o hrapavosti terena, orografiji i osnovnoj brzini vjetra, a određena je izrazom:

$$v_m(z) = c_r(z) c_0(z) v_b = 0,76 \cdot 1,05 \cdot 38,5 = 30,7 \text{ m/s}. \quad (3)$$

gdje su:

$c_r(z)$ – koeficijent hrapavosti terena kojim se uvažava promjenjivost prosječne brzine vjetra na mjestu građevine zbog visine iznad tla i hrapavosti terena s privjetrene strane građevine u promatranom smjeru vjetra [5],

$c_0(z) = 1,05$ – usvojeni koeficijent orografije uvećan za 5% u odnosu na jediničnu vrijednost što je granični kriterij za učinak terena na brzinu vjetra.

Koeficijent hrapavosti terena, $c_r(z)$ određen prema logaritamskoj raspodjeli brzina vjetra po visini $z = 10,0\text{m}$ određuje se sljedećim izrazom gdje su $z_{min} = 5\text{m}$ (za teren III. kategorije, šumovito područje), a $z_{max} = 200\text{m}$ [5].

$$c_r(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) = 0,76 \quad (4)$$

Koeficijent terena k_r ovisan o duljini hrapavosti, z_0 , za III. kategoriju terena (šumovito područje) i duljini hrapavosti $z_{0,II}$ (za II. kategoriju terena, područje niske vegetacije), određen je sljedećim izrazom:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \left(\frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,215 \quad (5)$$

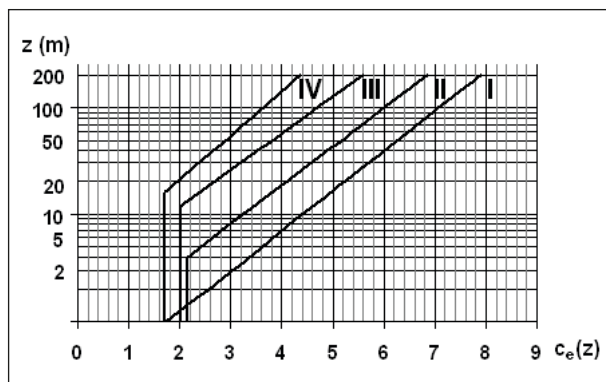
2.3.2. Turbulencija vjetra i vršni tlak izazvan turbulencijom vjetra

Intenzitet turbulencije $l_v(z)$ definiran je kao standardna devijacija turbulencije podijeljena s prosječnom brzinom vjetra [6]. Turbulentna komponenta brzine vjetra ima prosječnu vrijednost 0 i standardnu devijaciju turbulencije σ_v , koja je prema [5] dana izrazom:

$$\sigma_v = k_r v_b k_l = 0,215 \cdot 38,5 \cdot 1,0 = 8,29 \quad (6)$$

Prema [5], usvojena je preporučena vrijednost koeficijenta turbulencije, $k_l = 1,0$, a na osnovi ranije određenih vrijednosti, intenzitet turbulencije određen je u izrazu:

$$l_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_l}{c_0 \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} = 0,27 \quad \text{za } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (7)$$



Slika 6. Koeficijent $c_e(z)$ za regije od P5 do P10 [5]

Vršni pritisak vjetra $q_p(z)$ na visini z [5] uključuje prosječne i kratkotrajne promjene u brzini i može se odrediti prema sljedećem izrazu:

$$q_p(z) = c_e(z) q_b = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 2,0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 38,5^2 = 1,86 \text{ kN/m}^2 \quad (8)$$

gdje su:

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ – gustoća zraka ovisna o nadmorskoj visini, temperaturi i barometarskom tlaku koji se očekuje u području za vrijeme oluje,

$c_e(z) = 2,0$ – koeficijent položaja u ovisnosti o visini z iznad terena i kategorijama terena od I. do IV. za $c_t = 1$ (Slika 6).

2.3.3. Koeficijent sile za elemente pravokutnog presjeka i sile vjetra

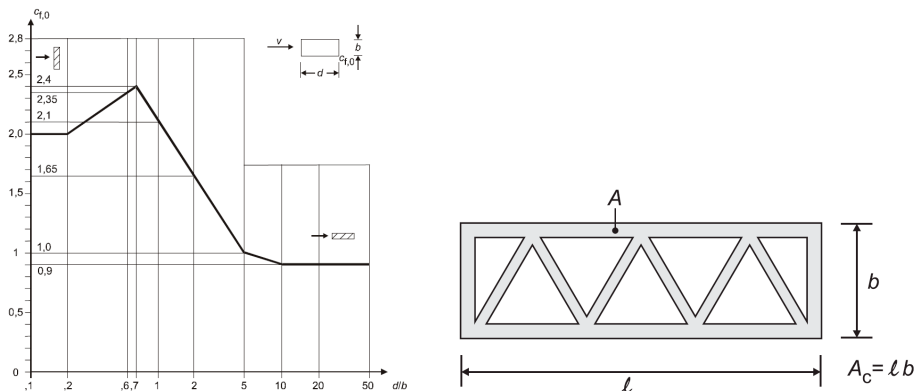
Koeficijent sile c_f daje ukupni učinak na konstrukciju ili njezine elemente, a ako nije drugačije određen, uključuje i trenje [5]. Za pravokutne elemente na čije lice presjeka vjetar puše okomito, može se odrediti prema izrazu:

$$c_f = c_{f,0} \psi_r \psi_\lambda \quad (9)$$

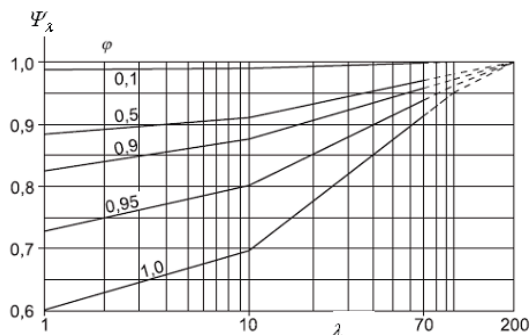
Koeficijent sile $c_{f,0}$ određen je prema dijagramu na Slici 7. Faktor smanjenja ψ_r (ovisi o Reynoldsovom broju), usvojen je za četvrtaste presjeke oštih rubova s $\psi_r = 1$. Faktor rubnih učinaka za elemente sa slobodnim protokom, ψ_λ , ovisi o vitkosti, λ (Slika 8), odnosno stupnju ispunjenosti, φ . Stupanj ispunjenosti φ , određen je prema slijedećem izrazu, kao odnos sume površine projiciranih elemenata, A , i ukupne površine, A_c :

$$\varphi = A / A_c \quad (10)$$

Prema Slikama od 7 do 9 i izrazu (10), stupnjevi ispunjenosti iznose: $\varphi = 0,27$ za Model A, odnosno $\varphi = 0,28$ za Model B [2].



Slika 7. Koeficijent sile $c_{f,0}$ za pravokutne presjeke, bez slobodnog protoka i opća definicija stupnja ispunjenosti [5]



Slika 8. Indikativne vrijednosti [5] faktora rubnih učinaka, ψ_λ

Za $l \geq 50$ m:

$$\lambda = 1,4 \cdot l/b \text{ ili } \lambda = 70 \text{ [5]}$$

Mjerodavna je manja vrijednost efektivne vitkosti konstrukcije, λ .

Za raspon konstrukcije $L = 67,4$ m (od unutrašnjih rubova temelja) i visine $b_A = 9,72$ m (Model A), odnosno $b_B = 18,54$ m (Model B), određene su sljedeće efektivne vitkosti konstrukcije, λ i faktori rubnih učinaka, ψ_λ :

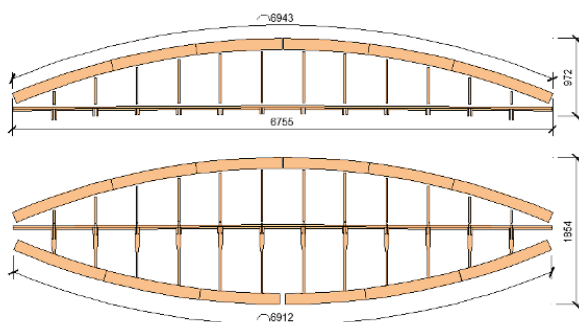
$$\lambda_A = 9,71 < 70 \rightarrow \psi_{\lambda,A} = 0,94 \quad \text{za model A}$$

$$\lambda_B = 5,08 < 70 \rightarrow \psi_{\lambda,A} = 0,93 \quad \text{za model B}$$

Prema općenitoj definiciji [7], koeficijent sile c_f za pojedini element na konstrukciji može se usvojiti prema sljedećim izrazima koji se u općem slučaju primjenjuju za pravokutne presjeke:

$$c_f = 0,94 \cdot c_{f,0} \quad \text{za Model A} \quad (11)$$

$$c_f = 0,93 \cdot c_{f,0} \quad \text{za Model B} \quad (12)$$



Slika 9. Vertikalna projekcija konstrukcije mosta [2] za Model A (gore) i Model B

Za sva tri smjera, djelovanja vjetrova koeficijente sila treba odrediti posebno, pa je opća vrijednost koeficijenta c_f mjerodavna onda kad prelazi vrijednost

koeficijenta $c_{f,x}$, referentnog za "normalne poprečne presjeke mostova" [5]. Koncentrirana opterećenja vjetrom, F_w i kontinuirano opterećenje vjetrom [2], q_w , proračunati su izrazima:

$$F_w = c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \text{ kN} \quad (13)$$

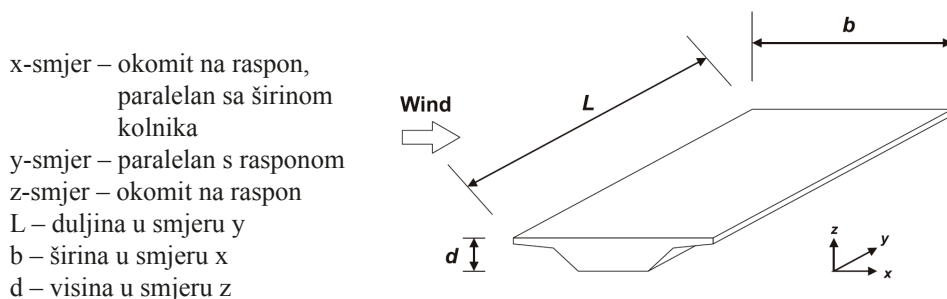
$$q_w = c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot h_{ref} \text{ kN/m} \quad (14)$$

gdje su [2]:

$c_s \cdot c_d \neq 1$ – za mostove raspona iznad 40m za koje je obvezna dinamička analiza na djelovanje vjetra, ali je zbog dostupnosti Nacionalnog dodatka s definicijom kriterija i vrijednosti umnoška, u proračunu usvojen s $c_s \cdot c_d = 1$

$q_p(z) = 1,86 \text{ kN/m}^2$ – vršni pritisak vjetra, određen prema izrazu (8),

A_{ref} i h_{ref} – referentna površina, u m^2 i referentna visina, u m, izložene vjetru.

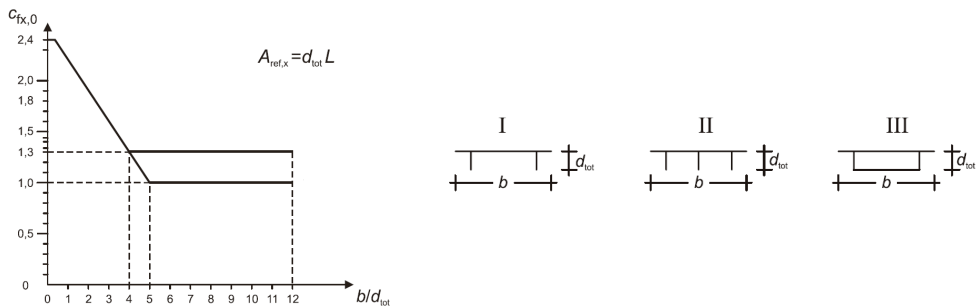


Slika 10. Smjerovi vjetra na most [5]

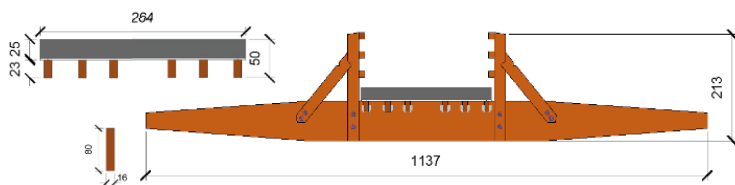
2.3.3.1. Sile vjetra i koeficijenti sile u x-smjeru

Sile u x i y smjeru rezultat su različitih smjerova djelovanja vjetra (Slika 10). One ne djeluju istovremeno, a sile z-smjera prouzročene strujanjem zraka pribrojene su x i y komponentama [5]. Budući da je most pješački, a servisno vozilo prometuje samo iznimno, proračunom se nije razmatralo smanjenje brzine vjetra. Koeficijent sile vjetra na kolnike mostova u x-smjeru usvojen je s $c_{f,x} = c_{f,x,0}$ i može iznositi 1,3 ili mu je vrijednost očitana s dijagrama na Slici 11 (uzeti su u obzir i parapeti). Koeficijenti sile vjetra za oštrobriđne presjeke usvojeni su prema dijagramu na Slici 7, a unos sile prikazan je na Slici 13 [2]. Za presjek kolničke konstrukcije je omjer $b/d_{tot} = 11,37/2,13 = 5,34$, a $c_{f,x,0} = 1,3$

(Slika 11). Koncentrirana sila za x-smjer vjetra na mjestima nalijeganja kolnika na dvodijelnu sekundarnu gredu, $F_{w,x} = 0,62$ kN, određena je za referentnu površinu para ovih greda, $A_{ref,x} = 2 \cdot (0,16 \cdot 0,8) = 0,256$ m², prema izrazu (13).

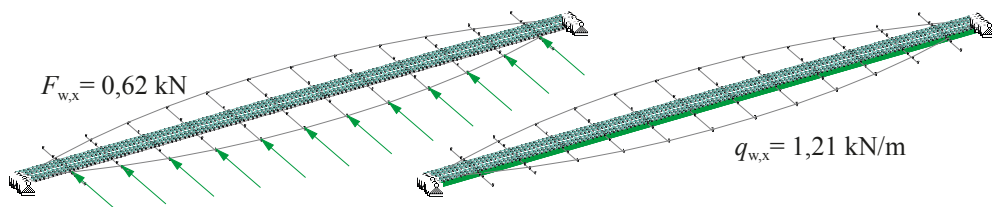


Slika 11. Koeficijenti sile vjetra $c_{f,0}$ za kolničku ploču mosta [5]



Slika 12. Poprečni presjek kolničke konstrukcije mosta za oba modela [2]

Na presjek kolnika, za omjer $b/d_{tot} = 2,64/0,5 = 5,28$ i $c_{f,x,0} = 1,3$ djeluje kontinuirano opterećenje $q_{w,x} = 1,21$ kN/m (Slika 13). Određeno je prema izrazu (14) za referentnu visinu vertikalne projekcije kolnika, $h_{ref,x} = 0,5$ m.

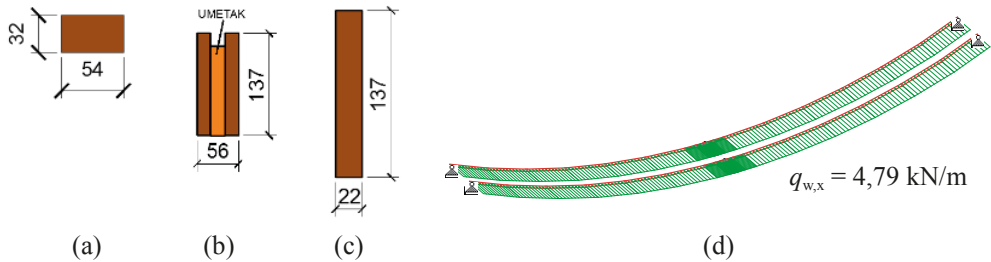


Slika 13. Model opterećenja vjetrom na sekundarne nosače, $F_{w,x} = 0,62$ kN i poprečni presjek kolnika, $q_{w,x} = 1,21$ kN/m

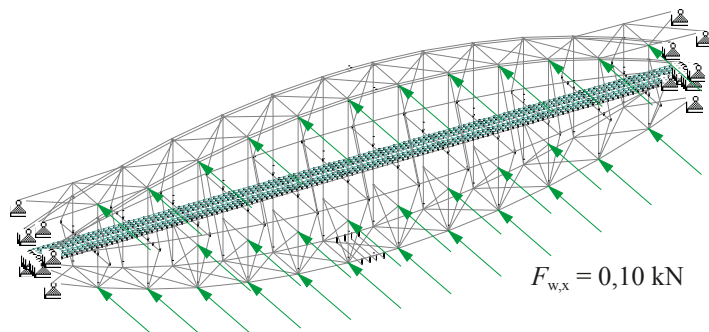
Ovakav postupak primijenjen je pri određivanju opterećenja vjetrom ostalih elemenata konstrukcije mosta i to za oba modela. Za slučajeve kad je prema

dijagramu na Slici 11 vrijednost koeficijenta sile $c_{f,x,0} > 1,3$ vrijednosti su im određene prema izrazima (11) i (12). Na Slici 14 prikazani su presjeci glavnih elemenata konstrukcija mosta na osnovu kojih su određivane vrijednosti koeficijenta sile i opterećenje vjetrom kao kontinuirano djelovanje, $q_{w,x} = 4,79$ kN/m čiji je intenzitet proračunat prema izrazu (14). Isti koncept modeliranja opterećenja primijenjen je na vješaljke gornjeg ustroja presjeka 22/23cm i stupove donjeg ustroja (Model B) presjeka 22/23cm u gornjoj polovici duljine, odnosno proširenog presjeka 22/54cm na donjoj polovici duljine. Za grede stabilizacijskih vezova (gornji, donji i interni spreg) i omjer $d/b_{tot} > 12$ usvojena je pretpostavljena vrijednost, $c_{f,x,0} = 1,3$. Popratne vrijednosti koeficijenta sile jesu vrijednosti određene za Model B:

$$c_{f,x,0} = 1,69, c_{f,x,0} = 2,07 \text{ i } c_{f,x,0} = 1,88$$



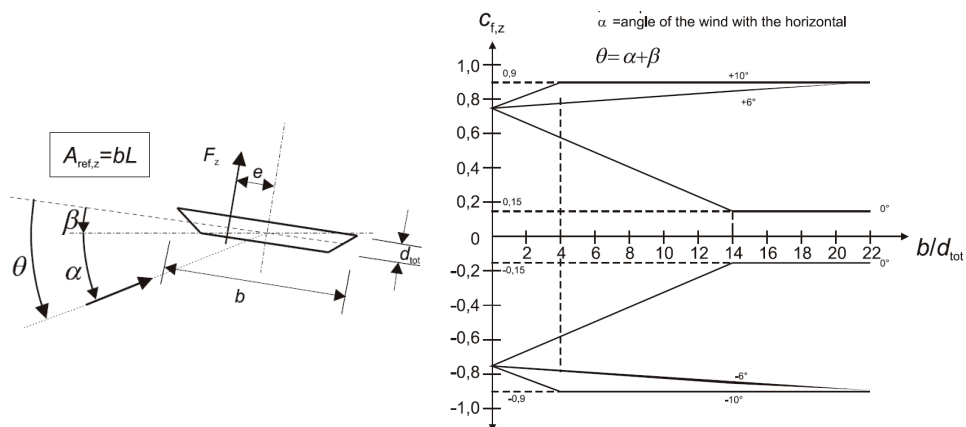
Slika 14. Model B – prikazi presjeka horizontalnih lukova lećaste rešetke (a), tlačnih lukova (b), vlačnih lukova (c) i modela opterećenja vlačnih lukova, $q_{w,x} = 4,79$ kN/m (d) [2]



Slika 15. Prikaz modela opterećenja vjetrom na stabilizacijske vezove za Model B [2]

2.3.3.2. Sile vjetra i koeficijenti sile u y-smjeru i z-smjeru

Intenziteti sila vjetra u y-smjeru određeni su kao 50%-ne vrijednosti sila vjetra u x-smjeru za rešetkaste dijelove konstrukcije mosta, odnosno 25%-ne vrijednosti za punostijene elemente [5]. Za elemente rasponske duljine l okomite na smjer puhanja vjetra sile su tretirane na način pokazan za djelovanje vjetra normalnog na presjeka. Za djelovanje vjetra u z-smjeru, u proračunu je usvojena vrijednost koeficijenta sile $c_{f,z} = \pm 0,9$ (za pritiskujuće i odižuće djelovanje vjetra) čime su na strani sigurnosti uvaženi utjecaj nepoznatog nagiba mosta i terena te promjena kuta nagiba sile vjetra na most uslijed turbulencije (Slika 16). Poredbena visina usvojena je kao za proračun koeficijenta sile x-smjera, ali bez primjene faktora vitkosti. Prema preporukama u normi EN 1991-1-4, usvojeni ekscentricitet sile jest $e = b/4$. Silom vjetra z-smjera opterećeni su masivni elementi, lukovi i kolnička ploča.



Slika 16. Odabir vrijednosti koeficijenta sile $c_{f,z}$ [5]

3. Analiza stabilnosti

U Tablicama 1 i 2 prikazani su rezultati analize stabilnosti koja je provedena za oba modela mosta pomoću računalnog programa Staad.pro, najprije samo na opterećenje vlastitom težinom, a potom i za mjerodavne kombinacije opterećenja [2]. Time su dobivene vrijednosti faktora izvijanja koji predstavljaju omjer kritičnog opterećenja i mjerodavne proračunske kombinacije. Ukoliko ta vrijednost prelazi 1, ona zapravo predstavlja faktor sigurnosti na izvijanje.

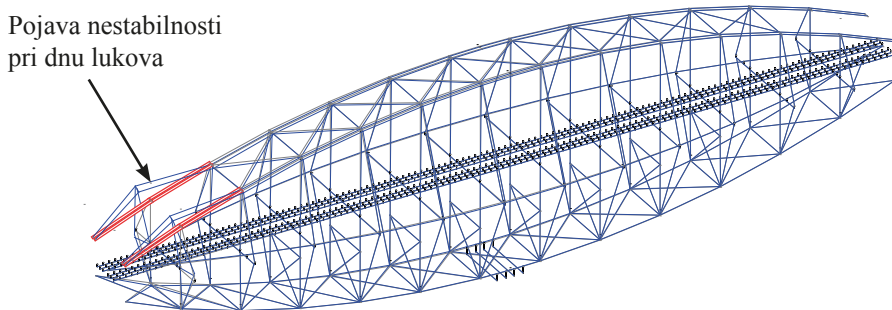
Tablica 1. Faktori izvijanja za Model A i Model B za opterećenje vlastitom težinom

Mod	Faktor izvijanja (Model A)	Faktor izvijanja (Model B)
1	7.123	13,057
2	7.251	13,204
3	7.475	14,039
4	7.606	14,248

Tablica 2. Faktori izvijanja za modele A i B za mjerodavnu kombinaciju opterećenja

Mod	Faktor izvijanja (Model A)	Faktor izvijanja (Model B)
1	0.570	1,377
2	0.577	1,532
3	0.671	1,907
4	0.678	2,140

Analiza stabilnosti konstrukcije pokazala je da Model A ne zadovoljava jer su vrijednosti mjerodavne kombinacije djelovanja gotovo dvostruko veće od vrijednosti kritične sile izvijanja u nekim elementima konstrukcije. Model B, izložen najvećem mogućem opterećenju, zadovoljava u pogledu stabilnosti.

**Slika 17.** Prvi (najkritičniji) mod izvijanja za Model B i mjerodavnu kombinaciju opterećenja [2] (tlocrtni prikaz) – nestabilnost nastupa pri dnu gornjih lukova

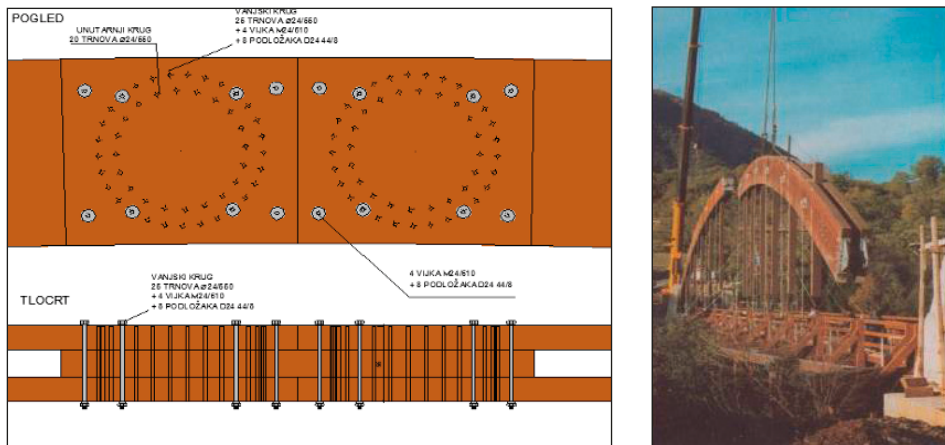
Vrijednost faktora izvijanja za prvi mod izvijanja (Model B) pokazuje da se proračunsko opterećenje može povećati za cca 37,7%. Taj podatak i povoljnije vrijednosti faktora izvijanja za ostale modove izvijanja bitni su i za proračun spojeva (npr. plastifikacija limova) i zamor materijala zbog određenog ciklusa nanošenja opterećenja (ne treba zanemariti ni mahovite udare vjetrova)

nitima naizmjeničnu promjenu njegove brzine u vremenu koja se može opisati funkcijom nekog nepravilnog oscilatornog gibanja obzirom da je vjetar stohastično djelovanje).

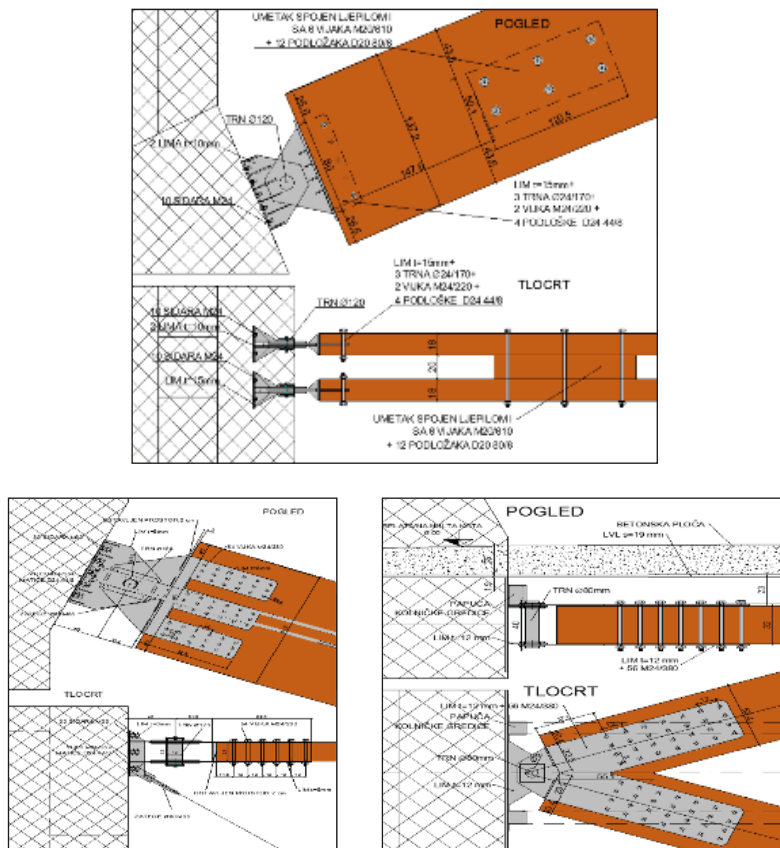
4. Dinamička analiza

Vrtložno odvajanje koje povećava opterećenje poprečno na smjer vjetra nastupa zbog naizmjeničnog odvajanja vrtloga s nasuprotnih strana konstrukcije ili presjeka [7], što bi u ovom slučaju bilo na rubovima presjeka luka, npr., oscilacije mogu nastupiti kad se vlastita frekvencija konstrukcije poklopi s frekvencijom vrtložnog odvajanja. Taj uvjet ispunjen je onda kada se brzina vjetra izjednači s kritičnom brzinom pri kojoj nastupa vrtložno odvajanje. Kritična brzina može se često pojavljivati i tako uzrokovati zamor, pa je i broj ciklusa opterećenja iznimno važan. Odziv konstrukcije izazvan vrtložnim odvajanjem sastoji se od širokopojasnog odziva koji nastaje neovisno o tomu giba li se konstrukcija te od uskopojasnog odziva koji potječe od gibanjem izazvanog opterećenja vjetrom i važniji je za lagane konstrukcije poput ove. Učinak vrtložnog odvajanja treba istražiti onda kada omjer najveće prema najmanjoj dimenziji konstrukcije prelazi 6 [5]. Obje te dimenzije uzimaju se u ravnini okomitoj na smjer vjetra, što je donekle problematičan zahtjev za ovakvu konstrukciju mosta zbog promjenjivih širina i visina duž njene osi. Za grube izmjere na sredini raspona konstrukcije, visinu od $\approx 18,5\text{m}$ i širinu od $12,5\text{m}$, omjer najveće prema najmanjoj dimenziji konstrukcije iznosio bi 1,45. Kako most nije punostijena konstrukcija, već je prilično "šupalj" ili prozračan, taj bi omjer bio i relevantniji za odnose dimenzija poprečnih presjeka elemenata. Za gornje lukove takav omjer iznosi 2,45, za donje lukove 6,24, a za kolničku konstrukciju 5,34, odnosno 5,28. Prema navedenom, najveći omjer daju donji, vlačni lukovi, no efekt koji bi izazvalo vrtloženje oko njih smanjenje je vlačnih napreznja u lukovima i pojava torzije, lako rješive dodatnim konstruktivnim mjerama. Stoga je kao referentni omjer odabran omjer cestovne konstrukcije u iznosu od 5,28 koji se odnosi na čisti poprečni presjek betonske ploče kruto spregnute drvenim sekundarnim gredama. Kao mjesto najveće koncentracije mase na mostu, kolnička je ploča najkritičnije područje sa stajališta mogućnosti ostvarenja torzije.

Obzirom da prethodno navedeni uvjet zovoljava zahtjeve norme [5], detaljnija analiza nije sprovedena, već su obavljene dodatne provjere prema [5] koje dovode do istog zaključka, a pojašnjene su u [2].



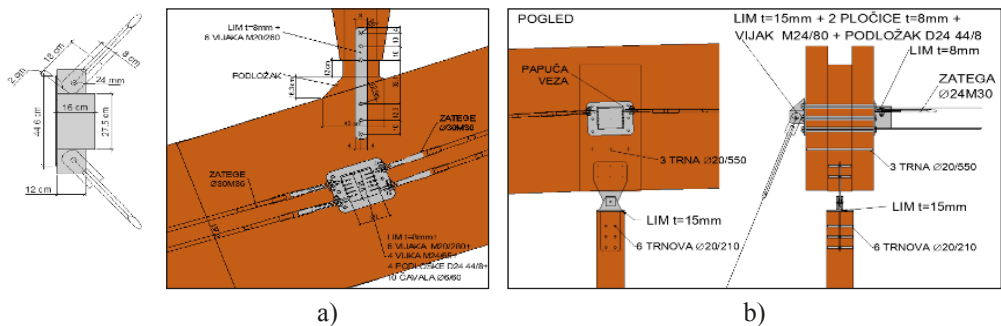
Slika 20. Montažni nastavak tlačnog gornjeg luka (lijevo) i prikaz montaže (desno)



Slika 21. Oslonci vlačnog luka (dolje lijevo), horizontalnog luka leće (dolje desno) i vertikalnog tlačnog luka (gore) [2]

Zglobni oslonci lukova i veza u tjemenu (Slike 18 i 21) proračunati su u skladu s konstrukcijskim zahtjevima (spajala, utisnuti limovi i bočni limovi) i zahtjevima izvedbe (CAM rezanje i bušenje limova). Dvostruki par gornjih lukova, četiri 36 metarska poluluka, čini šest 12m dugih segmenata presjeka $2 \times 18/137,2$ cm, a razdjelni elementi širine 20cm lokalno bočno ukružuju dijelove razmaknuto sastavljenog presjeka na svakih 4,0m (slika 20). Gornji i viseći (donji) lukovi jesu dva sustava od kojih svaki može neovisno prihvaćati vertikalni teret. Kolnička opterećenja prenose se na oba sustava preko vertikalnih štapova, tlačnih u donjim i vlačnih u gornjim dijelovima.

Mrežasti spregovi među lukovima su od drvenih horizontalnih greda presjeka $20/19,6$ cm [1] i čeličnih dijagonala profila 2M36 (Slike 1 i 3). Čvorne točke sprega lukova (Slika 22) su priključci vertikalnih štapova i bočnih čeličnih kablova koji osiguravaju stabilnost horizontalne leće. Viseći lukovi su tijekom montaže oslonac kolničkoj konstrukciji koja je, uključujući i leću, montirana iz 7 dijelova postavljenih na 24 stupa pred-montirana na visećim lukovima. Nakon montaže kolničke konstrukcije i leće postavljaju se gornji lukovi (Slika 20), gornji stupovi spajaju s donjim stupovima radi uspostavljanja kontinuiteta, a armiranobetonska kolnička ploča polaže se zadnja [1].



Slika 22. Priključci stupa i mekih dijagonala vjetrovnog veza na donji luk (a) i vješaljke na gornji luk (b) [2]

6. Zaključak

Statička analiza provedena na predzavršnom modelu mosta, nesimetričnom u odnosu na kolničku ravninu, pokazala je da bi opterećenje vjetrom izazvalo prevrtanje konstrukcije oko uzdužne osi, odnosno rotaciju cijelog presjeka [2]. Statičkom analizom dokazana je i optimalnost završnog rješenja u usporedbi s preglomaznim i prekrutim elementima koje bi zahtijevalo osiguranje stabilnosti predzavršnog modela. Završni model konstrukcije osigurava mostu elegantnije konture, održava vitkost konstrukcije jednakom i omogućava ravnomjerniju

raspodjelu sila. Rotacije poprečnog presjeka mosta dovedene su do granice dopustivih vrijednosti, pomaci ostvareni najnepovoljnijim slučajem opterećenja također, a manja su i naprezanja u elementima. Provjere su pokazale dostatnu otpornost i stabilnost svih presjeka i elemenata, čak i u uvjetima nepovoljnijeg opterećenja na zamišljenoj lokaciji mosta.

Na temelju provedene analize statičkog sustava, provjera graničnih stanja nosivosti elemenata i karakterističnih spojeva konstrukcije, može uslijediti zaključak da izvedena konstrukcija mosta ima sposobnost prihvatanja opterećenja i na zamišljenoj lokaciji na području Primorsko-goranske županije koja su nepovoljnija od onih na izvornoj lokaciji. Iako provedene analize takvu sposobnost potvrđuju, faktor globalne sigurnosti mosta izvornih dimenzija elemenata za zamišljenu lokaciju iznosi otprilike 1,38 (Tablica 2), što ipak upućuje na graničnu otpornost presjeka i stabilnost elemenata proračunatih za izvornu lokaciju mosta jer parcijalni faktor sigurnosti za drvo iznosi 1,3 [6]. Sa stajališta trajnosti, projekt mosta na zamišljenoj lokaciji s pretpostavljenim nepovoljnijim utjecajima okoliša zahtijevao bi dodatne mjere konstruktivne i aktivne zaštite. Uporaba uobičajenih zaštitnih sredstava sa svojstvima antiseptika i UV barijera podrazumijevala bi i konstruktivne mjere projektiranja detalja i zaštite koje bi spriječilo zadržavanje vode u drvu. Prikladna alternativa oblaganju čeličnim limovima mjesta s povećanim potencijalom zadržavanja vode jesu premazi lakom na osnovi kaučuka, što bi omogućilo isparavanje i kretanje vlage neometanim radom drva. Većina tvrdnji u zaključku temelji se na [2], gdje je problem analize konstrukcije mosta detaljnije obrađen.

7. Literatura

- [1] Bignotti Giorgio, Manchini Giuseppe. Design of Lao River Bridge, Italy. *Structural Engineering International*, 11: 177-179, 2001.
- [2] Kovačević Daniel. Most na rijeci Lao: Analiza konstrukcije lučnog drvenog mosta. *Diplomski rad*, Rijeka, 2009.
- [3] EN 1991-1-3:2003. Actions on structures - General actions - Part 1-3: Snow loads, CEN Brussels, 2003.
- [4] EN 1991-2:2003. Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges, CEN Brussels, 2003.
- [5] EN 1991-1-4:2005. Actions on structures - General actions - Part 1-4: Wind actions, CEN Brussels, 2005.
- [6] EN 1995-2:2004. Design of timber structures, Part 2: Bridges, CEN Brussels, 2004.
- [7] Peter Sach. *Wind forces in Engineering*. Pergamon Press, London, 2000.

ZAMJENA DOTRAJALIH KONSTRUKCIJA NOVIM PJEŠAČKIM DRVENIM MOSTOVIMA VEĆE TRAJNOSTI

REPLACEMENT OF DILAPIDATED BRIDGE STRUCTURES BY NEW PEDESTRIAN TIMBER BRIDGES OF GREATER DURABILITY

Nikola Lustig*, Adriana Bjelanović*, Igor Butorac**

***Sažetak.** Predrasude vezane za primjenu drva u graditeljstvu većinom su povezane s trajnošću, održavanjem i zaštitom drvenih konstrukcija. Činjenica je da drvo kao prirodni materijal ima iznimnu osjetljivost na utjecaj okoline pa konstrukcijama mostova koje su tome posebno izložene zato treba pristupiti posebno pažljivo želi li se ostvariti projektirani uporabni vijek. Stoga će se u ovome radu određeni prostor posvetiti kratkom pregledu mjera za očuvanje trajnosti i izlaganju o prirodnoj trajnosti drva. Posljedice neodržavanja ponekad su takve da dotrajalu konstrukciju jedino preostaje zamijeniti novom konstrukcijom. U radu će se prikazati dva rješenja takve obnove pješačkih mostova. Prvo rješenje predstavlja obnovu dotrajalog lijepljenog lameliranog mosta u Nacionalnom parku Plitvice pasarelom gotovo jednake konstrukcije, ali sa znatno poboljšanom konstruktivnom zaštitom. U radu će se prezentirati projekt konstrukcije mosta s glavnim nosačima sustava trozglobnog okvira sa sedlastim lameliranim gredama i prijedlozi konstruktivne i aktivne zaštite od kojih su neki izvedeni i na obnovljenoj konstrukciji mosta. Drugi prezentirani primjer jest natkriveni pješački i biciklistički drveni most osebujne rešetkaste konstrukcije glavnih nosača koji je zamijenio dotrajali masivni most. Glavni nosači su danas vrlo rijetko izvođenog Howe sustava, rešetke s križnim dijagonalama i prednapetim čeličnim vertikalama.*

***Ključne riječi:** pješački drveni mostovi, trajnost i zaštita, konstrukcija, trozglobni okviri sa sedlastim gredama, Howe rešetkasti sustav, mehanička otpornost i stabilnost, lijepljeno lamelirano drvo, karakteristični detalji.*

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: {nikola.lustig,adriana.bjelanovic}@gradri.hr

** GP Krk, Stjepana Radića 31, Krk
E-mail: igor.butorac@gp-krk.hr

Abstract. *Prejudice related to using timber in constructions is mostly based on durability, maintenance and protection of timber structures. It is a fact that timber as a natural material is extremely vulnerable to environmental influence. Therefore, measures needed to be taken to meet the expected durability will also be considered. Exposed timber structures are to be approached carefully if their structure life is to be fulfilled. The consequences of poor maintenance are sometimes so severe that the only thing to do is to replace the structure with a new one. In this paper two reconstructions of pedestrian bridges of this type will be presented. The first is the reconstruction of a deteriorated glued laminated timber bridge in the national park of Plitvice. The structure has been replaced with a new bridge that has almost the same structure, but its structural protection is improved. The project of the bridge structure with the main girders formed as three-hinge frames with pitch cambered glulam timber beams is presented. Also, constructive and active protection is suggested, parts of which have been applied to the replaced structure. The second reconstruction example is a timber bridge with a peculiar truss structure that has replaced the deteriorated massive bridge construction. The main girders are of a rarely performed Howe truss system, with cross diagonal timber struts and prestressed steel vertical rods.*

Key words: *pedestrian timber bridges, durability and protection, structure, three-hinge frames with pitch cambered beams, Howe truss system, mechanical resistance and stability, glulam, detailing.*

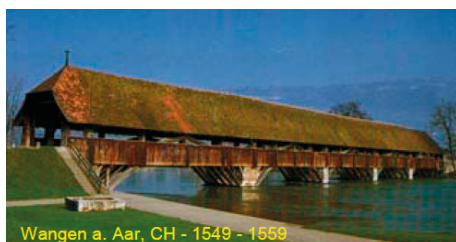
1. Uvod

Iako je sintagma o drvu kao prirodnom materijalu česta, drvo samo dolazi iz prirode, ali se u graditeljstvu primjenjuje neprirodno. U prirodi je drvo živo stabla provodnik vode i hranjivih tvari, mokro je i korom zaštićeno od gljiva i insekata, sunca i isušivanja. Ugrađeno drvo više nema prirodnu zaštitu, sklono je dimenzijskim promjenama, netrajnosti, tehničkoj i estetskoj nepostojanosti. Drvo je nehomogeno i anizotropno, srčika u sredini i bjeljika pod korom trupca znatno su slabije kakvoće od zdrave srčevine. Poznavanje svojstava preduvjet je njihove kontrole. Započinje organizacijskom zaštitom, rukovanjem građom i piljenjem trupaca na način koji osigurava odgovarajuću kvalitetu sirovine za gradbene sortimente. Drvo je u vanjskim uvjetima izloženo nizu kemijskih i fizikalnih promjena koje nepovoljno utječu na njegovu estetsku vrijednost i postojanost [1]. Sklonost drva biološkoj razgradnji truljenju i propadanju strukture svima je poznati fenomen.

Primjena drva za vanjske nosive konstrukcije poput mostova iznimno je zahtjevan oblik primjene drva, jer je zbog visokih estetskih, fizičkih i tehničkih zahtjeva koje treba ispuniti tijekom dugog razdoblja uporabe neophodan niz zaštitnih mjera. Tehnička i estetska postojanost boje i površinske strukture drva važni su atributi kvalitete gradnje. Tehnička postojanost podrazumijeva

udovoljavanje zahtjevima zaštite od vremenskih nepogoda, nepropusnost na kišu i zrak, dok estetska postojanost može imati i subjektivne odrednice [1]. Izbor vrste drva također je važan: četinjače (smreka i jela, bor i ariš) su jeftinije i manje mase, dimenzijski stabilnije od drva listača, ali im je trajnost slabija od tvrdih listača poput hrasta, kestena ili bagrema (teško obradivo drvo najviše kakvoće) čija je masa nedostatak pri izradi velikih elemenata. Zato se kombiniranje vrsta drva i sklopovi često koriste u izloženim konstrukcijama gdje je izbor materijala prilagođen funkciji i dimenziji elementa. Fizička zaštita jedan je od najznačajnijih načina otklanjanja štetnih djelovanja UV svjetlosti i oborina, konstruktivni detalji i površinska obrada iznimno su važni za trajnost, dok kemijsku zaštitu treba ograničiti i primijeniti samo u neizbježnim slučajevima.

Željena kvaliteta konstrukcije tako je svojevrsni balans težnje da se osigura najveća moguća postojanost drva i ostvare najmanji troškovi pri projektiranju, izgradnji i održavanju. Budući da je projektiranje zaštite jedan od sastavnih dijelova projekta i posebno važno za konstrukcije mostova, kratkom pregledu tema poput izloženosti, konceptu osiguranja postojanosti drva i zaštite ipak se mora i ovdje posvetiti određena pažnja.



Wangen a. Aar, CH - 1549 - 1559



Neubrugg, "Ponte nuovo", Berna - 1535

Slika 1. Primjeri višestoljetne postojanosti konstrukcije cestovnih drvenih mostova

2. Mjere osiguranja postojanosti i trajnosti drva u graditeljstvu

Koncept osiguranja postojanosti ima šest težišnih točaka [2]: pravilan izbor materijala, pravilno oblikovanje detalja i konstruiranje drvenih elemenata, dobru površinsku obradu i zaštitu te potrebu održavanja drva tijekom uporabe.

2.1. Fizička zaštita

Ovaj skup zaštitnih mjera predstavlja građevinsko-oblikovni koncept kojem je svrha umanjivanje i/ili sprečavanje intenzivne izloženosti vanjskim utjecajima poput kiše i sunčeva zračenja pri čemu je UV dio spektra posebno opasan. Primjer takve zaštite jest natkrivanje gornjeg ustroja mosta krovom (slika 1), odnosno odignutost stupišta od tla.

2.2. Izbor materijala

Pravilan izbor materijala, usklađen sa stupnjem izloženosti, značajno može umanjiti, pa čak i spriječiti štete ili nedostatke. Uporaba vrste drva [1] najviše moguće prirodne otpornosti na biološko razaranje, odnosno primjena dobro impregnirajućeg materijala velike dimenzijske stabilnosti i niske vlažnosti pri obradi (kapilarne upojnosti) primjeri su pravilne provedbe ove zaštitne mjere. U tablicama 1 do 3 dani su indikatori prirodne trajnosti drva (otpornost srčevine na gljive), razredi prirodne trajnosti i primjeri razvrstavanja pojedinih vrsta drva u razrede prirodne trajnosti.

Tablica 1. Indikatori upojnosti, dimenzijske stabilnosti i prirodne trajnosti [2]

Vrsta drva	Diferencijalno utezanje (promjena dimenzije / 1% sadržaja vlage) [%/%]	Gustoća [kg/m ³]	Razred prirodne trajnosti	Izmjena vlage
Bagrem	0.30	740	Vrlo trajno	Spora
Hrast	0.26	710	Trajno	Spora
Bor	0.28	540	Srednje trajno	Spora
Jela	0.21	460	Slabo trajno	Brza

Tablica 2. Razredi prirodne trajnosti i iskustvena trajnost u razredu opasnosti 4

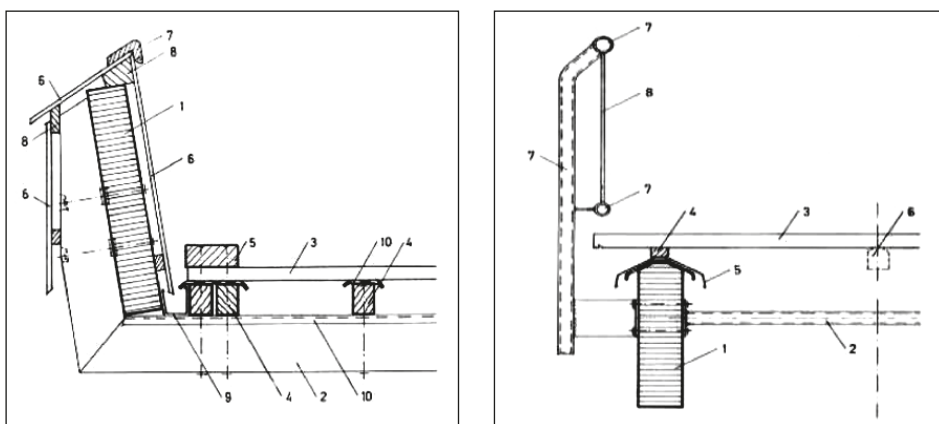
Razredi prirodne trajnosti prema normi HRN EN 350-2		Očekivani vijek u razredu opasnosti 4 (mokro, u dodiru s tlom)
Vrlo trajno	1	≥ 25 – 20 godina
Trajno	2	15 – 20 godina
Srednje trajno	3	10 – 15 godina
Slabo trajno	4	5 – 10 godina
Netrajno	5	manje od 5 godina

Tablica 3. Normirana i iskustvena trajnost pojedinih vrsta drva za gradnju [2]

Vrsta drva	Razred trajnosti prema normi HRN EN 350-2	Iskustvena trajnost vanjskih dijelova građevine	
		Izloženo, natkrivo	Izravno izloženo
Smreka / jela	4	60	55
Bor (srž)	3 – 4	100	60
Ariš	3 – 4	120	65
Hrast	2	150	100
Jasen	5	50	30
Bagrem	1 – 2	200	150

2.3. Konstruktivna zaštita

Karakteristični detalji i priključci elemenata konstrukcije mosta mogu bitno pridonijeti smanjenju nepovoljnih djelovanja oborina, prskanja vode i sunca na postojanost drvenih elemenata [1] jer pravilno projektiranje detalja (slika 2 i 3), znatno pridonosi bržoj odvodnji vode i sprečava njeno zadržavanje, kapilarno upijanje i nakupljanje u materijalu, a omogućava slobodne dimenzijske promjene drva. Oblaganje vodootpornim pločama ili pločama od trajnijih vrsta drva (slike 4, 5 i 6) također je djelotvorna zaštita osnovnog materijala.



Slika 2. Pravilno izvedena konstruktivna zaštita u konstrukcijama mostova – detalji [1]

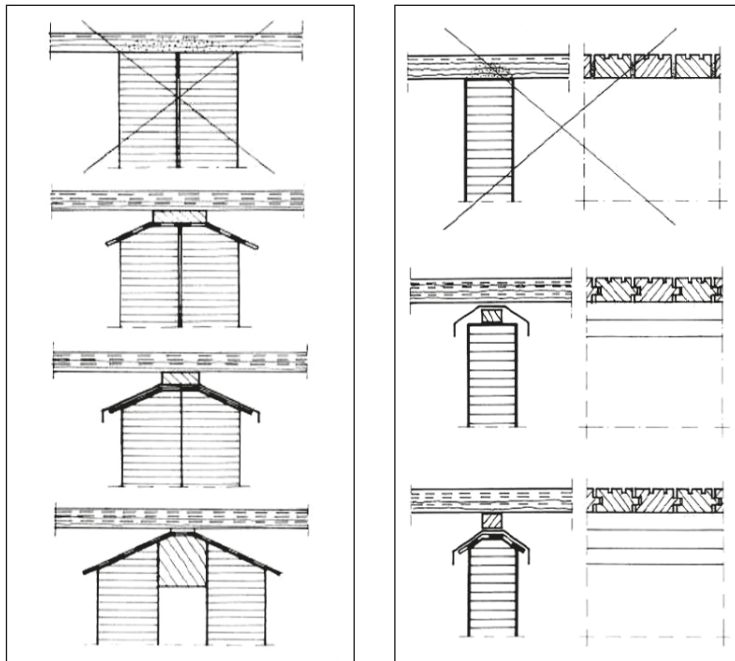


Slika 3. Primjeri korektne konstruktivne zaštite u izvedenim konstrukcijama mostova

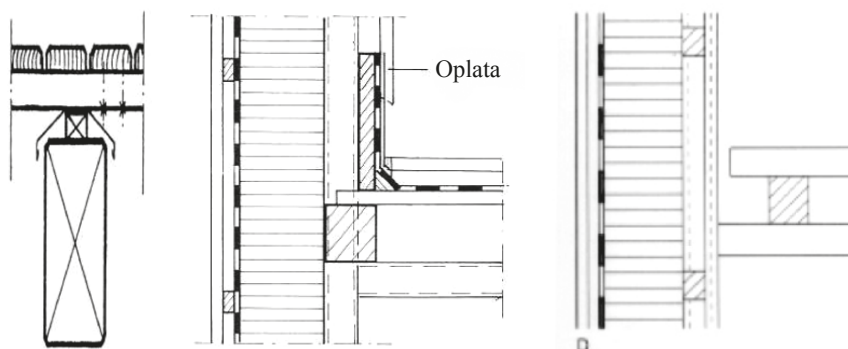


Slika 4. Pimjeri konstruktivne zaštita nosača oblogama od ariša

Dobra rješenja konstruktivne zaštite (slika 5, 6) uključuju skošene limove i odstojne letve. Spoj mosnica na utor i pero (slika 5, desno) može biti nezgodan jer zadržava, a ne propušta vodu. Raširene mosnice zakošenih bridova (slika 5, lijevo) bolje su rješenje za otjecanje vode i prljavštine.



Slika 5. Prikazi dobrih i loših rješenja konstruktivne zaštite LL nosača [1]



Slika 6. Nosači zaštićeni ventiliranim oplatama [1] ili limenom oblogom (lijevo)

2.4. Površinska obrada drva

Osim fizičke i konstruktivne zaštite, površinska obrada drva ima glavnu estetsku i zaštitnu ulogu u oblikovanju i održavanju izloženih elemenata.

Tradicionalna metoda zaštite površine je nanos materijala koji otvrdnjavanjem tvore čvrstu prevlaku na vanjskim drvenim građevnim elementima i sučelje su između drvene podloge i okoline. Budući da je površina drva podložna razgradnji zbog djelovanja vode, svjetlosti i mikroorganizama, od tankog sloja prevlake očekuje se da, osim estetske, ispuni i zahtjevnu zaštitnu funkciju. Osim zaštitne funkcije, prevlaka mora biti i jednostavna za primjenu, ugodna mirisa, brzo sušiva, ekološki prihvatljiva, trajna, širokog spektra boja, niske cijene i lako obnovljiva [2], što za proizvođače predstavlja kompliciran i težak zahtjev.

2.4.1. Vrste sredstava za površinsku obradu

Zadnjih dvadesetak godina intenzivirani razvoj novih vrsta proizvoda [2] za zaštitu drva izloženog vanjskim utjecajima unio je i zbrku u razlikovanju tradicionalnih generičkih termina: pigmentiranih prekrivnih materijala (eng. paint), nepigmentiranih prekrivnih materijala – lakova (eng. varnish) i lazura (eng. stain). Razvijen je niz novih proizvoda koji se ističu različitim ukrasnim i poboljšanim tehničkim svojstvima; njihova imena često zbunjuju korisnike, a u stručnim krugovima izazivaju žučne rasprave. Zbog nedjelotvornosti lazura u kontroli kretanja vode u drvu razvila su se sredstava s povećanim sadržajem veziva, tzv. “neprozirne lazure“ (eng. opaque stains), a potreba naglašavanja djelotvornosti upravo u zaštiti vanjskog drva iznjedrila je niz proizvoda koji se nazivaju vanjskim lazurama za drvo (eng. exterior wood stains). Europska praksa prepoznaje sljedeću podjelu sredstava: prema vrsti veziva (uljne alkidne i druge sintetičke smole otopljene u organskim otapalima koje se iz ekoloških razloga sve više zamjenjuju akrilatima, alkidima i njihovim mješavinama, zatim proizvodi s hibridnim vezivima otopljenim u vodi te proizvodi s “prirodnim” vezivima poput životinjskih i biljnih ulja, ribljeg i lanenog, otopljenih ili emulgiranim u vodi), prema pigmentaciji (nepigmentirani i stoga potpuno prozirni proizvodi poput prozirnih lakova, djelomično tj. lazirajuće pigmentirani i poluprozirni proizvodi i “pokrivni”, odnosno neprozirni pigmentirani proizvodi) te prema stvaranju filma (impregnirajuća sredstva koja ne stvaraju površinski film i u potpunosti prodiru u drvo, tankoslojne i debeloslojne lazure koje djelomično prodiru u unutrašnjost i sredstva koja stvaraju isključivo površinski film) [2].

2.4.2. Zaštitni tretmani

Vanjske prevlake uglavnom su nedovoljne da bi drvo zaštitile od biorazgradnje pa je moguća prethodna biocidna impregnacija. Pravilno nanoseno zaštitno sredstvo duboko prodire u drvo i štiti od organizama mikrorazaranja, uključivo i uzročnika promjene boje [2]. Kad se termin zaštitno sredstvo (eng. preservative) primjenjuje za lazure, podrazumijeva prisutnost fungicida. Pri procjeni nužnosti

kemijske zaštite treba uzeti u obzir prirodnu trajnost drva i njegovu primjenu. Nekadašnja pravila dobre inženjerske prakse zahtijevala su da se ugrađeno drvo obavezno biocidno impregnira, da oko njega struji zrak (može se prozračivati) i da je fizički dostupno kontroli, obnavljanju ili zamijeni. Danas se primjena kemijskih sredstava za zaštitu drva od djelovanja gljiva i insekata gdje god je moguće izbjegava ili svodi na najmanju mjeru. Razlozi tome su pojačana zabrinutost zbog toksičnosti takvih kemikalija u bliskoj okolini i ekološka svijest novih naraštaja. Zaštita okoliša favorizira drvo kao prirodni materijal kojem malo trebaju kemijske i tehnološke intervencije, što je zapravo nespojivo s trajnom promjenom koju uzrokuju kemikalije opasne po okoliš i nemogućnost recikliranja takvog drva u nove proizvode [2].

Novo ekološko ozračje navodi nove odrednice za primjenu biocidnih tvari: kemijska sredstva treba primjenjivati što manje i samo kad su neophodna, odnosno onda kad je rizik od trajnog vlaženja i truljenja velik, a te pojave neizbježne, kad konstruktivna i fizička zaštita nije provediva ili dostatna za osiguranje postojanosti, dok se kemijska impregnacija može primijeniti za nosive elemente i nedostupne elemente, odnosno za one čije je obnavljanje preskupo. Djelotvornu kemijsku zaštitu treba provesti stručno i temeljito te se preporuča da je izvode ovlaštteni pogoni za industrijsku tlačnu impregnaciju, a svim elementima koji se potom eventualno pile i dorađuju na gradilištu treba nanovo zaštititi čeone presjeke. Izuzetno su važni priprema površine drva i postupak nanošenja materijala za površinsku obradu.

2.4.3. Izbor sustava prevlake

Prevlaka za drvo mora istovremeno zadovoljiti zahtjev da strana u dodiru s drvom odgovara specifičnostima podloge [2], a vanjska strana bude otporna na vremenske uvjete i, ovisno o traženoj dimenzijskoj stabilnosti, i dekorativna. Provjereno rješenje jest projektiranje sustava čiji svaki dio ima zasebnu ulogu: temeljni sloj treba zadovoljiti adheziju i poroznost podloge, međusloj osigurati neprozirnost, boju i punoću filma, a završni sloj krajnju otpornost i sjaj prevlake. Složeni postupak nanošenja nedostatak je ovakvih višeslojnih prevlaka. Pri izboru sustava prevlaka izloženih vanjskim utjecajima, uz estetske su kriterije jednako važni, ako ne i važniji, tehničko-zaštitni kriteriji. Vodič za izbor i kvalitativno razvrstavanje brojnih vanjskih prekrivnih materijala za drvo jesu prve dvije u skupini europskih normi 927, EN 927-1 i DD ENV 927-2.

2.4.4. Održavanje i obnavljanje

Obnavljanje, periodični pregledi i održavanje ugrađenog drva nužni su za estetiku i tehničku funkcionalnost. Bez obzira što točnih preporuka nema,

iskustvo pomaže u određivanju razdoblja obnavljanja ne zanemarujući pritom očekivane rezultate održavanja i predviđeni vijek trajanja proizvoda [1]. Nosive konstrukcije s ugrađenim prirodno manje trajnim drvom treba kontrolirati svake dvije godine, dok konstrukcije od prirodno trajnijeg drva ili kemijski zaštićenog drva treba stručno pregledavati svakih deset godina.

3. Zamjena dotrajalih pješačkih mostova novim konstrukcijama

U europskim normama za projektiranje konstrukcija, uporabni vijek definira se kao razdoblje ne dulje od 50 godina tijekom kojeg treba održati zahtijevanu tehničku razinu. Projekt zaštite sastavni je dio projekta drvene konstrukcije, a sadrži potrebne mjere zaštite primjerene razredu opasnosti (tablica 4) u koji je konstrukcija razvrstana. Uobičajeno je dotrajale drvene konstrukcije zamijeniti novim konstrukcijama, a pri njihovu projektiranju treba primijeniti produbljena znanja o njihovoj trajnosti.

Tablica 4. Potrebe zaštite drva obzirom na prirodnu trajnost i uvjete izloženosti [2]

Razred opasnosti prema normi HRN EN 350-1		Razred trajnosti				
		1	2	3	4	5
		vrlo trajno	trajno	srednje trajno	malo trajno	nije trajno
1	Iznad zemlje i pokriveno (suho)					
2	Iznad zemlje i pokriveno (rizik vlaženja)					
3	Iznad zemlje, nepokriveno (razdoblja vlaženja)					
4	U dodiru s tlom ili vodom					
5	U slanoj vodi					

Legenda:

	Uvjeti u kojima je dovoljna prirodna trajnost, a zaštitni tretman nepotreban.
	Uvjeti u kojima je dovoljna prirodna trajnost, a zaštitni tretman preporučljiv je samo za dijelove izložene jakoj kondenzaciji.
	Uvjeti u kojima može biti dovoljna prirodna trajnost, a zaštitni tretman potreban ovisno o vrsti drva, permeabilnosti i uvjetima primjene.
	Uvjeti u kojima se preporuča zaštitni tretman jer je prirodna trajnost samo u određenim situacijama dovoljna.
	Uvjeti u kojima je zaštitni tretman neophodan.

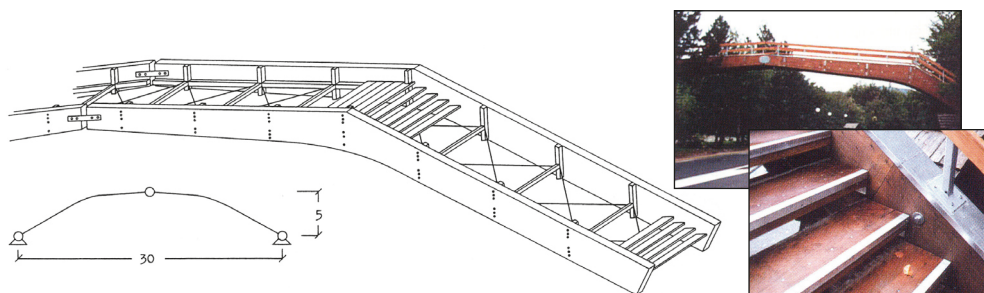
Primjeri dvaju pješačkih drvenih mostova koji će se u nastavku prezentirati izabrani su za ilustraciju prakse zamjene dotrajalih konstrukcija novim konstrukcijama poboljšane trajnosti, prvi kao replika izvorno drvene konstrukcije, a drugi kao primjer zamjene oštećenog masivnog grednog mosta drvenom konstrukcijom osebujnog estetskog i projektnog rješenja.

3.1. Pješački drveni nathodnik u Nacionalnom parku Plitvička jezera

Izvorna konstrukcija drvenog pješačkog nathodnika iznad državne ceste D1 na ulazu u nacionalni park Plitvička jezera izvedena je 1971. godine (slika 7), a svega 17 godina kasnije zbog dotrajalosti zamijenjena gotovo identičnom. Smješten na 605 m nadmorske visine, u II. zoni opterećenja i snijegom i vjetrom (zone određene prema normama HRN EN 1991-1-3 i HRN EN 1991-1-4), svojom je geometrijom nathodnik usklađen s prometnim profilom.

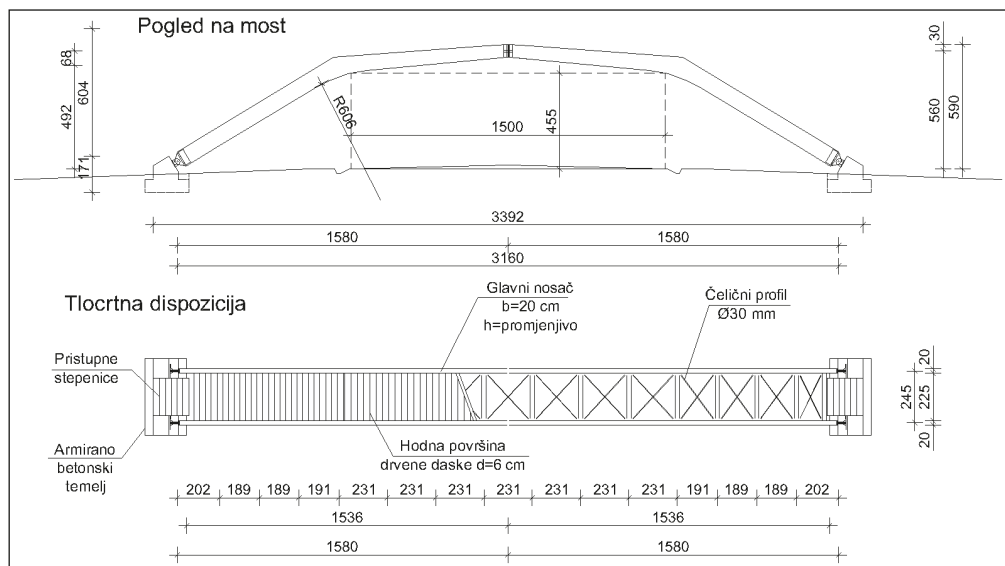
3.1.1. Projektno rješenje

Radna podloga projektu mosta koji je izrađen u okviru diplomskoga rada [3], bio je dispozicijski nacrt novog nathodnika koji je kao dio idejnog rješenja izrađen 1996. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.



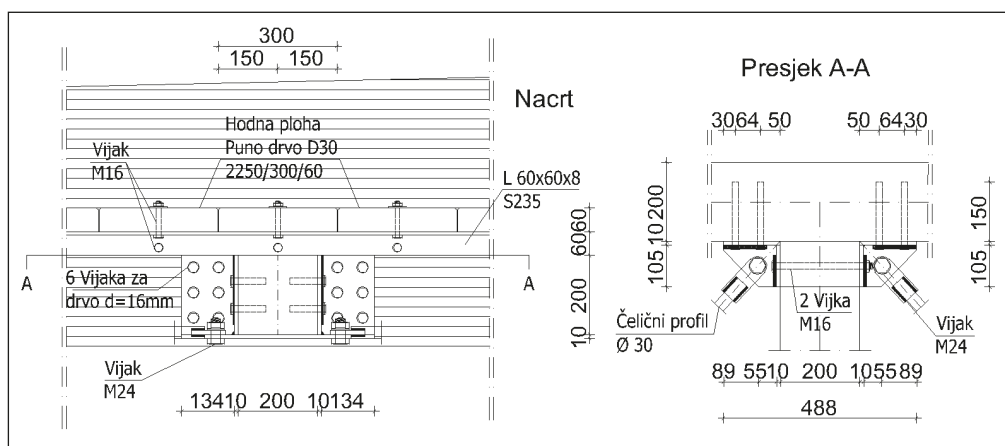
Slika 7. Prikaz izvorne konstrukcija iz 1971. godine (lijevo) zamijenjene 1998. (desno)

Proračun proveden u diplomskome radu trebao je pokazati usklađenost tog rješenja s novim odrednicama projektiranja drvenih mostova prema normi niza EN 1995 s dodatnim osvrtom na zaštitu i trajnost. Dispozicijsko rješenje [3] prikazano je na slici 8. Proračunati statički sustav je trozglojni okvir raspona 31,5 m sa sedlastim gredama velike zakrivljenosti od homogenog LLD četinara I. razreda čvrstoće (GL 28h). Širina grede je 20 cm, visina je promjenjiva: od 80 cm na osloncu i 95,72 cm u sljemenu, do 60 cm u tjemenu okvira. Hodna površina, upuštena ispod ekstradosa, kombinacija je stepenica i klasične hodne plohe, a izvedena od hrastovih dasaka visine 6 cm, širine 30 cm i dužine 225 cm (masivno drvo razreda čvrstoće D30).



Slika 8. Dispozicijski nacrt nathodnika prema kojem je proveden proračun [3]

Hodna ploha priključena je na glavni nosač kutnicima L60x60x8 mm i s dva vijka za drvo promjera $d = 12$ mm, odnosno četiri vijka za drvo promjera $d = 12$ mm u zoni stepenica. Bočna stabilnost konstrukcije riješena je rešetkastim spregom mekih čeličnih dijagonala (s napinjalkama) promjera $\text{Ø}30$ mm (razreda čvrstoće S235) i drvenih poprečnih greda širine 20 cm i visine 20 cm (LLD, GL28h) čija je funkcija samo stabilizacijska. Izvedbeni nacrt priključka ispune sprega na glavne nosače (slika 9) uobičajen je u praksi projektiranja drvenih konstrukcija.



Slika 9. Priključak ispune sprega

3.1.2. Analiza opterećenja

Za izradu modela pješačkog nathodnika provedena je analiza opterećenja na konstrukciju. U analizi opterećenja uzeta su u obzir opterećenja snijegom, vjetrom, promjenjivo opterećenje pješacima i stalno opterećenje (od vlastite težine glavne i sekundarnih greda, hodne plohe, stepenica, ograde i čeličnih dijelova: sprega te spojnog pribora). Opterećenje snijegom proračunato je prema normi EN 1991-1-3:2003 modelom opterećenja snijega na nadhodnik kao za dvostrani krov istog nagiba. Utjecaj vjetra modeliran je prema normi EN 1994-1-4:2005. Model opterećenja vjetrom u poprečnom smjeru sastoji se od opterećenja vjetrom na prvi nosač mosta (aproksimiran je pravokutnom gredom visine 20 cm, širine 79 cm, duljine 33,36 m) i opterećenja na ploču mosta u x-smjeru prema točki 8.3.1. norme EN 1991-1-4:2005 (poprečni smjer puhanja vjetra na most). U iznos opterećenja ploče mosta vjetrom u poprečnom smjeru uračunat je i utjecaj parapeta (LL glavnih nosača). Ukupno opterećenje vjetrom prihvaćaju izloženi nosač i nosač u zavjetrini opterećen razlikom ukupnog opterećenja i opterećenja nosača na udaru vjetra. Model opterećenja vjetrom uključuje i odižući vjetar na ploči mosta. Za određivanje opterećenja snijegom i vjetrom korišteni su nacionalni dodaci za prednorme NA/ENV (jedini dostupni 2008. godine).

Promjenjivo opterećenje pješacima (opterećenje servisnim vozilima i biciklistima nije moguće zbog stepeništa) određeno je prema normi EN-1991-2:2003. Servisna vozila i biciklisti nemaju mogućnost pristupa mostu radi stepenica. Utjecaji modeliranog opterećenja simulacija su stvarnog opterećenja [3]: u vertikalnom smjeru modeli kontinuiranog (s umanjnjem početne vrijednosti jednolikog opterećenja i samo na nepovoljnim dijelovima, uzdužno i poprečno) i koncentriranog opterećenja. Razrađena su ukupno četiri različita slučaja kontinuiranog opterećenja pješacima (cijeli most opterećen poprečno i uzdužno u punom profilu i simetrično, poprečno opterećen u punom profilu i uzdužno na polovici raspona, poprečno opterećen na polovici profila i uzdužno po cijelom rasponu mosta, što je tlocrtno nesimetričan model za najveće torzijske utjecaje, te opterećen poprečno i uzdužno na pola raspona). U modelu s koncentriranim vertikalnim opterećenjem, položaj opterećenja je variran tako da proizvodi najveće utjecaje na konstrukciju. Sva horizontalna opterećenja modelirana su kao 10%-tni iznos odgovarajućeg vertikalnog opterećenja.

3.1.3. Razmatranja o utjecaju izloženosti na projektna rješenja (mehanička otpornost i trajnost)

Budući da je dispozicijski nacrt idejnog rješenja izvedene konstrukcije bio radna podloga provedenog proračuna, dimenzije i geometrija proračunatog okvira približno su jednaki onima predloženim u idejnom rješenju, a analiza

rješenja provedena je za tri različita slučaja s varijacijom razreda uporabe i izvedbe sedlaste grede (puni i smanjeni statički presjek u sljemenu zakrivljene zone). Najopterećeniji presjek je u sljemenu, a za nosivost je mjerodavna provjera kombiniranog naprezanja grede okomitim vlakom i smikom od poprečne sile.

Prva razmatrana varijanta odnosila se na razvrstavanje nathodnika u razred uporabe 3 (prema normi EN 1995 i jedino pravilno za drvenu konstrukciju izloženu utjecaju okoliša) i izvedbu sedlaste grede pune statičke visine u sljemenu (nalijepljeno tjeme, vanjske zakrivljene lamele pokrivene ravnim). Zbog drastičnog smanjenja proračunskih mehaničkih svojstava, mjerodavna provjera graničnog stanja pokazala je nedostatak nosivosti za približno 20%. Moguće sanacijsko rješenje predstavljalo bi armiranje grede u zakrivljenoj zoni ulijepljenim šipkama s navojem ili samonareznim vijcima za drvo koji bi u potpunosti preuzeli okomita vlačna naprezanja u drvu.

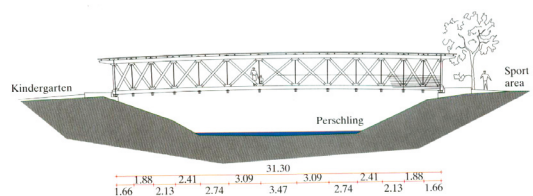
U drugima dvjema razmatranim varijantama, konstrukcija je razvrstana u razred uporabe 2. Takav pristup zahtijeva oblage lica greda okvira zamjenjivim vodoodbojnim furnirskim pločama koje se preko odstoynih letvi (cirkulacija zraka) pričvršćuju za nosače koji se onda smiju smatrati zaštićenima od izravnog utjecaja vlage. Dva slučaja izvedbe sedlaste grede koji su za takve mjere zaštite i razvrstanost konstrukcije razmatrani jesu: tjeme je nalijepljeno (puna statička visina sedlaste grede) i tjeme je nasađeno tj. pokrivanje gornjih zakrivljenih lamela ravnim lamela nije predviđeno pri čemu se greda smatra gredom zaobljenog tjemena (smanjeni poprečni presjek u sljemenu). U prvom od dva spomenuta slučaja otpornost kritičnog presjeka u sljemenu pune visine na kombinaciju okomitog vlaka i posmika iznosila je 90% granične otpornosti, a u drugom s nasađenim tjemenom karakteristični je presjek smanjene visine dostigao 84% granične otpornosti.

Planirane i izvedene mjere konstruktivne zaštite (čela i rubovi nosača obloženi čeličnim limom radi zaštite od vlaženja i UV zračenja prikazane na slici 7 i lica nosača presvučena vodootpornim furnirskim pločama) te obrada površina lazurnim premazima nužne su za očuvanje postojanosti drva. Drvo smreke odabrano za izvedbu glavnih nosača ima slabu prirodnu trajnost (razred trajnosti 4 prema tablicama 2 i 3), malu upojnost za vodu, srednju dimenzijsku stabilnost i malu otpornost na gljivice i insekte, a mogućnosti impregnacije su slabe (ocjena za srževinu). U uvjetima odabrane konstruktivne zaštite koja uključuje i oblaganje lica furnirskim pločama, a čela i rubova presjeka čeličnim limovima s manjim rizikom kondenzacije, nosači se mogu razvrstati u razred opasnosti 2 prema tablici 4 (natkrivenost, rizik vlaženja), a kemijski zaštitni tretman od biorazgradnje (impregnacijom) nije potreban. Površinska obrada sustavom dvoslojne prevlake (zaštita od vlage i UV zračenja) ili samo tankoslojna

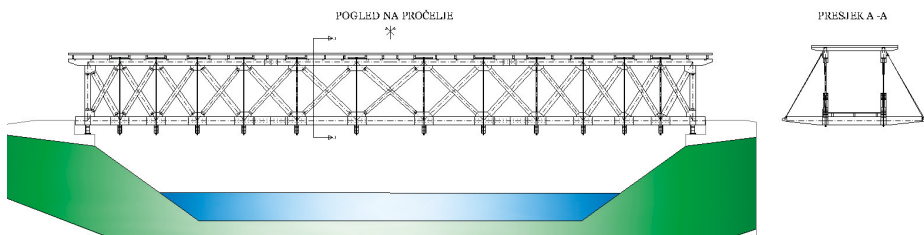
lazura (za obložena lica greda) djelomičnog prodora u drvo sasvim zadovoljava. Preporuča se vodoodbojno zaštitno sredstvo koje ipak sadržava fungicid, malu količinu voska, smolu ili sušivo ulje i otapalo (voda). Takve prevlake tek iznimno sadržavaju stabilizatore koji smanjuju propadanje od sunčeva zračenja pa su dovoljne za površine zaštićene od sunčeve svjetlosti. Prevlaku treba obnavljati svake dvije godine (najviše tri) pri čemu je trošak obnove malen.

3.2. Pješački i biciklistički drveni most rešetkastog Howe sustava

Radni predložak (slika 11) za izradu diplomskoga rada [4] je članak objavljen u SEI 12(3):2002 s osnovnim podacima [5] o uzdužnoj i poprečnoj dispoziciji te statičkom sustavu mosta izvedenog u Böhheimkirchenu (Austrija, projektanati: Wilhelm F. Luggin i Karin Luggin-Erol). Izvorni projektni zadatak bio je novom konstrukcijom zamijeniti 80 godina star i već dotrajali masivni most preko rijeke Perchling čiju je statiku narušilo podlokavanje srednjeg stupa u olujnom nevremenu. Prihvaćeni prijedlog projektanta i izvedena nova drvena konstrukcija mosta jest osuvremenjeno rješenje povijesnog (19.st.), a danas vrlo rijetko izvođenog Howe sustava rešetkastih nosača s prednapetim čeličnim vertikalama i križnim drvenim dijagonalama što je omogućilo i zadržavanje postojećih upornjaka. Howe sustav razvijen je 1840. godine i prvi put primijenjen pri izgradnji Eri-eve željeznice 1845. godine. Zanimljiv je podatak da je na rasponima ne većim od 30,0 m, do 1890. godine ukupna duljina svih izvedenih Howe nosača na prugama SAD-a iznosila oko 2000 km.



Slika 11. Radni predložak – pogled na izvedeni drveni most i uzdužna dispozicija [5]



Slika 12. Dispozicijsko rješenje projekta drvenog mosta na zamišljenoj lokaciji [4]

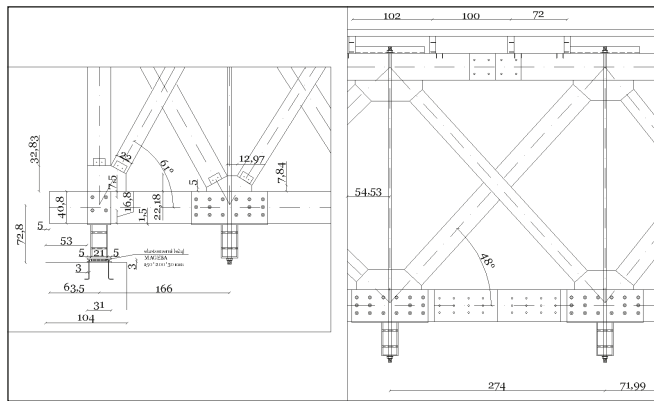
U projektnom rješenju (slika 12) izrađenom u diplomskome radu [4] pretpostavljena je lokacija riječnog mosta u Zagrebačkoj županiji na 200 m nadmorske visine. Mostom bi se ostvarila komunikacija između golf terena i rekreacijske zone i omogućilo odvijanje pješačkog i biciklističkog prometa te nesmetano prometanje servisnih i interventnih vozila.

3.2.1. Projektno rješenje mosta na zamišljenoj lokaciji

Raspon konstrukcije jest 31,3 m, uporabna širina iznosi 2,74 m, a svijetla visina 3,0 m. Oslanjanje rasponske konstrukcije na upornjacima riješeno je elastomernim ležajevima. Krovna drvena konstrukcija dijelom je ne samo novog arhitektonskog rješenja već i naslijeđene povijesne estetike te koncepta fizičke zaštite drvene nosive konstrukcije mosta. Konstrukciju jednostranog krovišta minimalnog nagiba s pokrovom od čeličnog lima debljine 0,8 mm (obojen zeleno zbog usklađenosti s okolišem) čini lijepljenjem sastavljeni sklop poprečnih greda širine 80 mm i visine 200 mm na rasteru od cca 1,0 m (lijepljeno lamelirano drvo razreda čvrstoće GL 28h) i KLH troslojnih daščanih ploča debljine 75 mm (KLH je oznaka proizvođača). Krovna konstrukcija preuzima vertikalna djelovanja od vlastite težine, pokrova i promjenjivih djelovanja snijega i vjetra, a ujedno je i dio rješenja prostorne stabilizacije. Oslonjena je na gornje pojaseve rešetkastih nosača mosta (tipski kutnik od lima debljine 2,0 mm i profilirani čavli promjera 4,0 mm i duljine 80 mm).

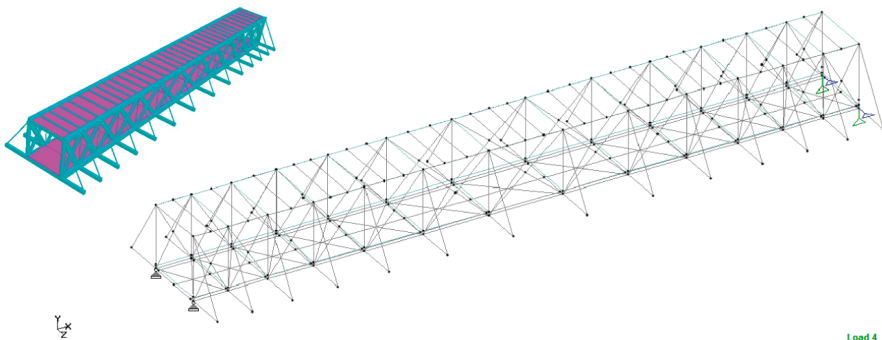
Glavni nosači rasponske konstrukcije jesu dvije Howe rešetke na osnovnom rasteru od 3,0 m. Materijal je homogeno lijepljeno lamelirano drvo I. razreda čvrstoće (GL28h). Pojasevi rešetke su širine 260 mm i visine 408 mm (bočno sastavljene lamele) s dva montažna nastavka (vlačni u donjem pojasu) kako bi se most na gradilištu mogao montirati iz tri dijela sastavljena u radionici. Rešetke imaju po 13 polja duljine od 1,66 m do 3,47 m. Sve "silazne" dijagonale su jednodijelnog presjeka širine 100 mm i visine 300 mm, a "uzlazne" su dvodijelnog razmaknuto sastavljenog presjeka širine 80 mm i visine 220 mm čije dijelove na polovici duljine lokalno bočno ukružuje jednodijelna dijagonala priključena vijcima M16 i lijepljene kladice u četvrtinama duljine. Krajnje vertikale rešetke su drvenog presjeka širine 100 mm i visine 300 mm, a sve su ostale čelične prednapete šipke promjera Ø42 mm (sustav Halfen-Deha). Karakteristični detalji oslanjanja rešetke, montažnih nastavaka pojaseva, priključaka ispune i poprečnih nosača proračunati su prema europskim normama EN 1995 i EN 1993 i prikazani na slici 13. Prema proračunu i tehničkim podacima proizvođača, uvjete na osloncima rešetki zadovoljavaju Mageba elastomerni ležajevi (tip B) dimenzija 150/200/30 mm.

Kolnička konstrukcija oslonjena je na ukupno 14 poprečnih nosača presjeka širine 180 mm i visine 408 mm. Priključci poprečnih nosača na donji pojas rešetke ostvaruju se zavarenim čeličnim limovima i vijcima M24. Prepusti poprečnih nosača iznose 2,0 m i na svakom su kraju čeličnim zategama $\text{Ø}20$ mm (Halfen-Deha sustav) povezani s gornjim pojasom rešetke, što poprečnom presjeku mosta osigurava stabilnost. Kolnička konstrukcija sastoji se od tri uzdužna nosača presjeka širine 80 mm i visine 180 mm na koje se čavla daščana hodna ploha (hrastove daske razreda čvrstoće D40, debljine 50 mm). Mosnice su međusobno povezane “na utor i pero” i utorenim čavlima promjera 4,0 mm i duljine 100 mm. Kolnička konstrukcija predstavlja sklop koji se u segmentima montira na donji pojas rešetke, a priključci se ostvaruju čeličnim kutnicima i utorenim čavlima. Horizontalna stabilizacija kolnika riješena je rešetkastim spregom s čeličnim dijagonalama promjera $\text{Ø}20$ mm Halfen-Deha sustava.



Slika 13. Primjeri nekih karakterističnih detalja – oslonac rešetke i priključci ispune [4]

3.2.2. Statički model i analiza opterećenja



Slika 14. Model mosta u Staad.pro 2007 programu [4] – linijski i pločasti konačni elementi (gore)

Prostorni model konstrukcije mosta modeliran je u Staad.pro računalnom paketu, a ulazni parametri i analize provedeni su posebno za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti. Iz prikaza na slici 14 vidljiva je i definicija oslonaca rešetkastih nosača. Poprečni nosači kolničke i krovne konstrukcije, uzdužni nosači konstrukcije kolnika (hrptovi sastavljenog presjeka) i pojasevi rešetki modelirani su kao štapni ("beam") elementi. Drveni elementi ispune rešetki su rešetkasti elementi ("truss") s mogućnošću preuzimanja samo osnih sila pri čemu su geometrijska svojstva dvodijelnih elemenata zadana primjenom opcije usporednog I-presjeka. Dijagonalna čelična ispuna spregova u ravnini kolnika i krova te kose zatege modelirani su kao "tension only" konačni element (KE), odnosno elementi koji mogu preuzeti samo vlačne osne sile. S obzirom na mogućnost unosa sile prednapinjanja (početna sila prednapinjanja zadana opcijom "initial tension"), vlačne čelične vertikalne rešetke zadane su kao "cabel" KE. Pločasti ("plate") KE primjenjeni su za modeliranje hodne plohe kolnika i krovne plohe i preko njih je opcijom "pressure on full plate" zadavano pripadajuće opterećenje [4].

Stalno opterećenje krovne konstrukcije modelirano je kao plošno opterećenje krovnih daščanih ploča, a intenzitet toga opterećenja $g = 0,61$ kN/m² dijelom je zadan kao vlastita težina. Slično načelo primijenjeno je i za unos stalnog opterećenja kolničke konstrukcije. Vlastita težina svih elemenata modela zadana je automatskom opcijom programa za definiranu gustoću materijala i svojstva presjeka. Prema normi EN 1991-2, opterećenje pješacima definirano je za priliv ljudi intenziteta $q_{rk} = 5,0$ kN/m², a prometno opterećenje interventnim / servisnim vozilom zadano je kao osovinski pritisak $Q_{SV1} = Q_{SV2} = 15$ kN. Intenzitet opterećenja snijegom (jednostrani ravni krov) za odabranu lokaciju mosta jest $s_k = 1,05$ kN/m² (prema normi EN 1991-1-3).

Opterećenje vjetrom određeno je u skladu s normom EN 1991-1-4, za I. kategoriju terena i osnovnu brzinu vjetra $v_b = 22$ m/s. Vršni pritisak vjetrom na nezaštićenu nadstrešnicu (7,5m iznad razine vode) određen je kao $q_{p(z)} = 0,79$ kN/m². Pritisak vjetra na rešetke određen je postupkom proračuna prema normi EN 1991-1-4 (za koeficijent sile, $c_f = 1,6 \cdot 1,0 \cdot 0,93 = 1,49$, koeficijent ispunjenosti $\phi = 0,5$ i efektivnu vitkost $\lambda = 17,95$ proračunatu linearnom interpolacijom za raspon $L = 31,3$ m). Kontinuirano opterećenje vjetrom na gornji i donji pojas rešetke na udaru vjetra iznosi $F_w = 1,0 \cdot 1,49 \cdot 0,79 \cdot 1,5 = 1,172 \cdot 1,5 = 1,758$ kN/m. Opterećenje vjetrom okomito na zaklonjenu rešetku određeno je prema normi JUS.U.C7.100:1991 (prevedena, nepublicirana ISO norma, prethodnica EC1) s koeficijentom zaklonjenosti $k_x = 0,32$ ovisnim o koeficijentu ispunjenosti, $\phi = 0,5$ i omjeru razmaka i visine rešetki, $x/h = 1,0$. S tim u skladu, kontinuirano opterećenje vjetrom okomito na pojaseve zaklonjene rešetke određeno je kao $F_w = 0,32 \cdot 1,758 = 0,56$ kN/m. Pritisci vjetra na

kolničku konstrukciju (x, y i z-smjer) određeni su u skladu s uobičajenom procedurom danom u normi EN 1991-1-4 detaljnije objašnjeni u diplomskome radu [4] gdje je prikazan i način nanošenja svih navedenih opterećenja na elemente proračunskog modela mosta. Dinamička analiza za djelovanje vjetra nije provedena jer to raspon mosta (< 40,0m) ne zahtijeva.

Sila prednapinjanja u čeličnim vertikalama određena je iterativnim postupkom pri čemu je temeljni zahtjev da se za sve proračunske kombinacije u križnim drvenim dijagonalama eliminira vlačno naprezanje, odnosno tlačno naprezanje vertikala (detalji priključaka ispune na pojaseve time postaju jednoobrazni). Empirijski izraz kojim se može odrediti sila prednapinjanja temelji se na određivanju najveće vlačne sile u drvenim dijagonalama nenapetog sustava, tj. projekciji te sile na pravac vertikale uz dodatno uvećanje za 30% (zbog gubitka sile prednapinjanja). Odabranim iterativnim postupkom [4], početna vrijednost sile prednapinjanja iznosi $P = 100$ kN. Kombiniranje sile prednapinjanja sa stalnim djelovanjem riješeno je u skladu s normom EN 1993-1-11 (za proračun konstrukcija s vlačnim elementima). Vlačne vertikale razvrstane su prema istoj normi u tip A (prednapete šipke) i od čelika su kvalitete S355, a prevencija prekomjernog okomitog tlaka (gnječenje vlakana pri pritezanju vertikala) riješena je čeličnim U-profilima na površini dodira. Prednapinjanje vertikala treba prethoditi montaži krovne konstrukcije. Povoljan učinak prednapinjanja na progib rešetkastog nosača posebnost je i jedan od razloga izbora ovog sustava. Razlike u vrijednostima početnih progiba na polovici raspona rešetke između prednapetog i nenapetog sustava iznose približno 10% [5].

Obzirom na početnu pretpostavku proračuna mehaničke otpornosti i stabilnosti drvenih elemenata o razvrstavanju konstrukcije u razred uporabe 3 što je znatno smanjilo proračunske vrijednosti mehaničkih svojstava materijala, izbor statičkog sustava svojsvrstan je doprinos eleganciji konstrukcije koja je u potpunosti ostvarila nosivu i uporabnu funkciju s najmanjim utroškom građe, a k tome se i izvrsno uklopila u okoliš.

3.2.3. Zaštita i očuvanje postojanosti drvene konstrukcije

Odabrani drveni materijal je lijepljeno lamelirano drvo smreke, razvrstan u slabo trajna drva. Premda poduzete mjere fizičke zaštite natkrivanjem znatno pridonose očuvanju tehničke i estetske postojanosti, razvrstavanje konstrukcije u razred opasnosti 2 (tablica 4) moguće je samo za pojedine dijelove mosta, no nije sasvim prihvatljiva opcija za rešetkaste glavne nosače zbog izloženosti lica većine elemenata rešetke (razvrstavanje u razred opasnosti 3). Gornji pojasevi rešetke zaštićeni su strehom krovne kućice od padalina, a donjim pojasevima rešetke donekle pruža vanjska ograda. Površinska obrada (prevlaka) trebala bi

spriječiti intenzivno propadanje (eroziju), omogućiti stabiliziranje dimenzija i spriječiti razvoj pukotina izazvanih promjenama sadržaja vlage, zaštititi od vode i UV zračenja te djelomično omogućiti zaštitu od biorazgradnje. Rješenja mogu biti polutransparentne penetrirajuće lazure na osnovi ulja ili alkida koje sadržavaju fungicide, UV stabilizator i vodoodbojno sredstvo. Alternativa su ili jako pigmentirane lazure s biocidnim dodacima koje se nanose u jednom ili dva sloja minimalne debljine 50 μm (ili temeljni premaz lakom), ili gusto pigmentirane laklazure u dva nanosa (ili pokrivna boja za drvo 100 μm ukupne debljine sloja). Poželjna je i konstruktivna zaštita oblaganjem čela i rubova presjeka pojaseva čeličnim limovima.

4. Zaključak

Produbljena znanja o svojstvima, prirodnoj trajnosti i mjerama zaštite drva čija je svrha očuvanje tehničke i estetske postojanosti drva i važnih atributa njegove primjene u graditeljstvu posebno su značajna za konstrukcije izložene utjecaju okoliša. Projekt zaštite sastavni je dio projekta drvene konstrukcije, ali su obnavljanje, pregledi i odgovarajuće održavanje ugrađenog drva neizbježni želi li se održati zahtijevana funkcionalnost i estetika. Na primjerima dvaju mostova čija su projektna rješenja rezultat obnove dotrajalih konstrukcija upravo se zato nastojala istaknuti važnost takvog pristupa dajući mu prednost pred provedenim proračunom konstrukcije, te promovirati drvo kao materijal kojem odgovarajući koncept zaštite može znatno poboljšati trajnost i zajamčiti veću zastupljenost u današnjem ekološki osviještenom graditeljskom okruženju.

5. Literatura

- [1] H. Turkulin, V. Jirouš Rajković, D. Bogner. Površinska postojanost drvnih građevinskih konstrukcija, *Šumarski list*, 121 (11/12): 617-630, 1997.
- [2] H. Turkulin, V. Jirouš Rajković, D. Bogner. Structural effects of weathering on unprotected and painted wood, Turkulin Hrvoje, ur., *Surface properties and durability of exterior wood building components*, 1–20. Faculty of Forestry, Zagreb, 1999.
- [3] N. Lustig. Pješački most u Nacionalnom parku Plitvice. *Diplomski rad*, Rijeka, 2009.
- [4] I. Butorac. Howe rešetkasta konstrukcija pješačkog drvenog mosta, *Diplomski rad*, Rijeka, 2009.
- [5] F.W. Luggin, K. Luggin-Erol. Historic Timber Bridge System, Böhheimkirchen, Austria. *Structural Engineering International*, 12: 182-184, 2002.

TROKUTNI KONAČNI ELEMENT ZA ANALIZU SREDNJE DEBELIH PLOČA UPOTREBOM VEZANE INTERPOLACIJE

TRIANGULAR FINITE ELEMENT FOR MODERATELY THICK PLATE ANALYSIS USING LINKED INTERPOLATION

Teo Mudrić*, Gordan Jelenić**

Sažetak. U ovome radu provedena je numerička analiza problema deformiranja linearno elastičnih pločastih nosača. Numerička analiza provedena je primjenom metode konačnih elemenata. Upotrijebljen je trokutni konačni element s vezanom interpolacijom za polje pomaka koji se temelji na Mindlinovoj teoriji srednje debelih ploča. Ponašanje spomenutog elementa testirano je na tri tipiska problema te na debelim i tankim pločama.

Ključne riječi: metoda konačnih elemenata, Mindlinova teorija srednje debelih ploča, trokutni element za ploče, vezana interpolacija

Abstract. In this paper a numerical analysis for deformation of linear elastic plates has been carried out. Numerical analysis is performed using the finite element method. A triangular finite element with linked interpolation for transverse displacements based on Mindlin moderately thick plate theory was used. The performance of the mentioned element was tested on three typical problems and on thick and thin plates.

Key words: finite element method, Mindlin moderately thick plate theory, triangular element for plates, linked interpolation

* Università degli studi di Padova, Dipartimento di costruzioni e trasporti, Via Marzolo 9, Padova, Italia
E-mail: teo.mudric@studenti.unipd.it

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: gordan.jelenic@gradri.hr

1. Uvod

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma i predstavlja posebne varijante Galerkinove i Rayleigh-Ritzove metode. Njenom se uporabom rješavanje problema mehanike konstrukcija svodi na rješavanje sustava algebarskih jednadžbi umjesto sustava diferencijalnih i/ili integralnih jednadžbi koji, vrlo često, i nemaju egzaktno rješenje [1].

Ploče su specijalan slučaj trodimenzionalnog kontinuuma kod kojih je debljina jako mala u usporedbi s ostalim dimenzijama.

Teorija tankih ploča temelji se na pretpostavkama koje je formulirao Kirchhoff 1850. god. [2], pa se njegovo ime vezuje uz ovu teoriju, premda je jednu raniju verziju 1811. god. prezentirala Sophie Germain [2]. Modifikaciju Kirchhoffove teorije ploča učinili su Reissner 1945. god. [2], i u nešto malo drugačijem obliku Mindlin 1951. god. [2]. Ove modificirane teorije proširuju primjenu teorije na debele ploče te se zbog toga teorija debelih ploča naziva još i Reissner-Mindlinova teorija ploča [2].

U ovome radu izvršena je analiza naprezanja i deformacija ploča metodom konačnih elemenata. Analize su provedene uporabom trokutnih konačnih elemenata s vezanom interpolacijom [3] za polje pomaka. Navedeni trokutni konačni element temelji se na Mindlinovoj teoriji srednje debelih ploča.

Rad je organiziran na sljedeći način. U poglavlju 2 dane su osnove Mindlinove teorije srednje debelih ploča. Također su dani i izrazi za energiju deformacije i potencijal vanjskog opterećenja, čime je određena potencijalna energija ploče. U 3. poglavlju obrađeni su trokutni konačni element s linearnom interpolacijom polja pomaka i zaokreta i trokutni konačni element s vezanom interpolacijom za polje pomaka. Za navedene elemente dane su interpolacijske funkcije i funkcije pomaka te izrazi za matricu krutosti, vektor opterećenja i jednadžbu ravnoteže konačnog elementa. U poglavlju 4 napravljen je patch test za oba elementa iz poglavlja 3 te je provedena numerička analiza tipskih testnih problema na kojima je testirano ponašanje trokutnog konačnog elementa s vezanom interpolacijom za polje pomaka.

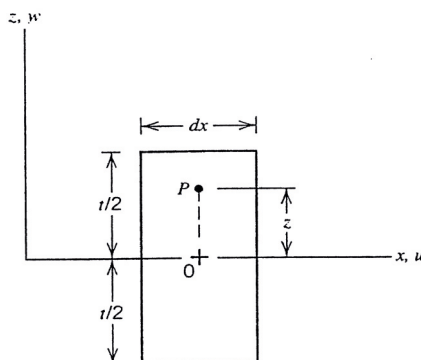
2. Mindlinova teorija srednje debelih ploča

Pod pojmom *ploča* podrazumijeva se plosnato tijelo koje zauzima domenu

$$\Omega = \left\{ (x, y, z) \in \mathcal{R}^3 \mid z \in \left[-\frac{t}{2}, +\frac{t}{2} \right], (x, y) \in \mathcal{A} \subset \mathcal{R}^2 \right\}$$

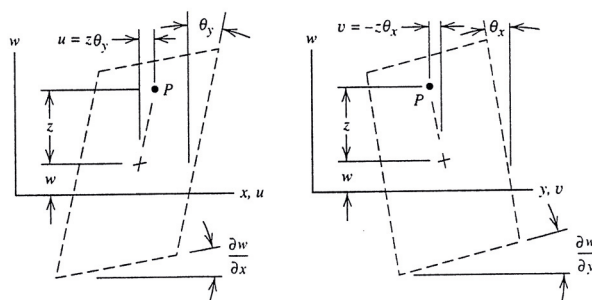
gdje se ravnina $z=0$ podudara sa srednjom plohom neopterećene ploče, a poprečna dimenzija (ili debljina) t je mala u odnosu na ostale dvije dimenzije. Osim toga, opterećenje $p(x,y)$ može djelovati samo u smjeru okomitom na srednju plohu.

Na Slici 1 prikazan je diferencijalni dio ploče koji je izdvojen s dvije ravnine okomite na os x .



Slika 1. Diferencijalni dio ploče debljine t prije opterećenja [4]

Pod djelovanjem opterećenja diferencijalni element sa Slike 1 poprima deformacije prikazane na Slici 2, gdje su θ_x i θ_y komponente rotacije linije koja je prije deformacije bila okomita na srednju plohu.



Slika 2. Pomaci poprečnog presjeka paralelnog sa xz ravninom i poprečnog presjeka paralelnog sa yz ravninom [4]

Sa Slike 2 uočava se da presjeci koji su prije deformacije bili ravni i okomiti na srednju plohu nakon deformiranja mogu poprimiti rotacije različite od rotacija srednje plohe te na taj način ne ostaju okomiti na srednju ravninu ploče, ali i dalje ostaju ravni. Na taj se način u Mindlinovoj teoriji srednje debelih ploča [4] uzimaju u obzir poprečne posmične deformacije,

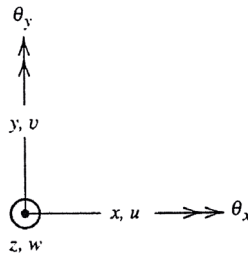
što ovu teoriju razlikuje od Kirchhoffove teorije tankih ploča [4] kod koje se poprečne posmične deformacije zanemaruju, a poprečni presjeci koji su prije deformiranja bili okomiti na srednju plohu, nakon deformiranja ostaju okomiti na srednju plohu. Normalne deformacije u smjeru osi z se zanemaruju ($\varepsilon_z=0$).

Pomaci proizvoljne točke P u smjeru koordinatnih osi određeni su sljedećim izrazima:

$$u = z\theta_y, \quad v = -z\theta_x, \quad w = w(x, y) \quad (1)$$

gdje je u pomak u smjeru osi x , v pomak u smjeru osi y i w pomak u smjeru osi z .

Positivni smjerovi rotacija θ_x i θ_y prikazani su na Slici 3.



Slika 3. Pomaci i pozitivni smjerovi rotacija θ_x i θ_y [4]

Veza između deformacija i pomaka prikazana je kinematičkim jednadžbama:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_b = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = z \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \\ -\frac{\partial \theta_x}{\partial y} \\ \frac{\partial \theta_y}{\partial y} - \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \end{bmatrix} = z \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & -\frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \theta_y \\ \theta_x \end{Bmatrix} = z \mathbf{D}_b \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_x \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y} & 0 & -1 \\ \frac{\partial}{\partial x} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \theta_y \\ \theta_x \end{Bmatrix} = \mathbf{D}_s \mathbf{u} \quad (3)$$

gdje su \mathbf{D}_b i \mathbf{D}_s matrice diferencijalnih operatora, a \mathbf{u} je vektor funkcija pomaka.

Veza naprezanja i deformacija prikazana je konstitutivnim jednadžbama [5]:

$$\sigma_b = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\sigma_s = \begin{Bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

gdje je E Youngov modul, a ν je Poissonov koeficijent.

Rezultante naprezanja i njihove momente u poprečnim presjecima dobivene su integriranjem naprezanja i momenata naprezanja po visini ploče:

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz, \quad M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz, \quad M_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z dz, \quad (6)$$

$$S_y = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{yz} dz, \quad S_x = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{zx} dz, \quad (7)$$

kao

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \\ -\frac{\partial \theta_x}{\partial y} \\ \frac{\partial \theta_y}{\partial y} - \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{Bmatrix} S_y \\ S_x \end{Bmatrix} = \frac{Etk}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_x \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \theta_y \end{Bmatrix} \quad (9)$$

U izrazu (8) M_x je specifični moment savijanja (po jedinici duljine) u smjeru osi x , M_y je specifični moment savijanja u smjeru osi y i M_{xy} je specifični moment uvijanja (torzije). U izrazu (9) S_y je specifična poprečna sila (po jedinici duljine) u smjeru osi y i S_x je specifična poprečna sila u smjeru osi x .

Koeficijent k je korekcijski koeficijent kojim se uzima u obzir nejednolikost posmičnih naprezanja, a obično se uzima da iznosi 5/6 [6].

2.1. Potencijalna energija ploče

Potencijalna energija tijela sastoji se od potencijalne energije deformacije ϕ i potencijala vanjskog opterećenja U :

$$\Phi = \phi - U \quad (10)$$

Energiju deformacije možemo izraziti kao zbroj energije deformacije od savijanja (ϕ_1) i energije deformacije od poprečnog posmika (ϕ_2), pa je ukupna energija deformacije:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (11)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \int_{A-t/2}^{t/2} \int \boldsymbol{\varepsilon}_b^T \boldsymbol{\sigma}_b dz dA + \frac{k}{2} \int_{A-t/2}^{t/2} \int \boldsymbol{\varepsilon}_s^T \boldsymbol{\sigma}_s dz dA \quad (12)$$

Uvrštavanjem (2), (3), (4) i (5) u (12) dobiva se:

$$\phi = \frac{1}{2} \int_A \mathbf{u}^T \mathbf{D}_b^T \mathbf{C}_b \mathbf{D}_b \mathbf{u} dA + \frac{1}{2} \int_A \mathbf{u}^T \mathbf{D}_s^T \mathbf{C}_s \mathbf{D}_s \mathbf{u} dA \quad (13)$$

gdje su \mathbf{C}_b i \mathbf{C}_s matrice elastičnosti i prikazane su sljedećim izrazima:

$$\mathbf{C}_b = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_s = \frac{Etk}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Za ploču opterećenu površinskim opterećenjem u smjeru osi z (p_{sz}), koncentriranom silom u smjeru osi z ($P_{z,n}$) koja djeluje u nekoj točki sa koordinatama (x_n, y_n) , koncentriranim momentom oko osi x ($M_{y,n}$) koji djeluje u nekoj točki sa koordinatama (x_n, y_n) i koncentriranim momentom oko osi y ($M_{x,n}$) koji djeluje u nekoj točki sa koordinatama (x_n, y_n) potencijal vanjskog opterećenja prikazan je sljedećim izrazom:

$$U = \int_S p_{sz} w dS + P_{z,n} w(x_n, y_n) + M_{x,n} \theta_y(x_n, y_n) + M_{y,n} \theta_x(x_n, y_n) \quad (15)$$

3. Trokutni konačni element za analizu srednje debelih ploča

Trokutni konačni element koji će se upotrijebiti ima tri čvora koji se nalaze u vrhovima trokuta. Svaki čvor ima tri stupnja slobode, što znači da element ima ukupno devet stupnjeva slobode. Stupnjevi slobode u svakom čvoru su: pomak

u smjeru osi z (ima oznaku w), rotacija oko osi y (ima oznaku θ_y) i rotacija oko osi x (ima oznaku θ_x).

3.1. Trokutni konačni element s linearnom interpolacijom polja pomaka i rotacija

Raspodjele poprečnih pomaka (w), rotacija oko osi y (θ_y) i rotacija oko osi x (θ_x) prikazane su sljedećim funkcijama:

$$w = \sum_{i=1}^3 N_i w_i \quad \theta_y = \sum_{i=1}^3 N_i \theta_{yi} \quad \theta_x = \sum_{i=1}^3 N_i \theta_{xi} \quad (16)$$

gdje su N_i ($i=1,2,3$) funkcije oblika, a w_i , θ_{yi} i θ_{xi} ($i=1,2,3$) pomak i rotacije čvorova i .

Interpolacijske funkcije N_1 , N_2 i N_3 (ili funkcije oblika) su linearne i prikazane su sljedećim izrazima:

$$N_1 = \frac{1}{2\Delta} [y_3 x_2 - y_2 x_3 + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (17)$$

$$N_2 = \frac{1}{2\Delta} [y_1 x_3 - y_3 x_1 + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (18)$$

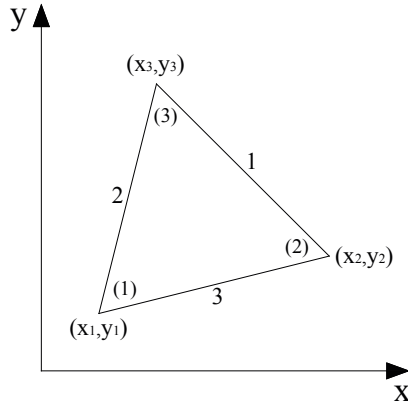
$$N_3 = \frac{1}{2\Delta} [y_2 x_1 - y_1 x_2 + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (19)$$

U izrazima (17), (18) i (19) x_i i y_i su koordinate čvorova i ($i=1,2,3$), a Δ je površina trokutnog konačnog elementa prikazanog na Slici 4.

Izraze (16) možemo zapisati i u matričnom obliku:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} w(x, y) \\ \theta_y(x, y) \\ \theta_x(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \mathbf{a} = \mathbf{N} \mathbf{a} \quad (20)$$

gdje je \mathbf{u} vektor funkcija pomaka, \mathbf{N} matrica interpolacijskih funkcija i $\mathbf{a}^T = \langle w_1 \quad \theta_{y1} \quad \theta_{x1} \quad w_2 \quad \theta_{y2} \quad \theta_{x2} \quad w_3 \quad \theta_{y3} \quad \theta_{x3} \rangle$ vektor čvornih pomaka.



Slika 4. Trokutni konačni element

3.2. Trokutni konačni element s vezanom interpolacijom za polje pomaka

Za interpolaciju poprečnog pomaka kod ovoga je elementa upotrijebljena vezana interpolacija [2, 3, 5]. Uporabom vezane interpolacije dobivamo funkciju poprečnih pomaka w koja je za jedan stupanj viša od funkcija rotacija θ_y i θ_x što je potrebno za granični slučaj tanke ploče kada su rotacije derivacije poprečnih pomaka.

Raspodijela poprečnog pomaka (w) po elementu određena je sljedećom funkcijom [2]:

$$w = \sum_{i=1}^3 N_i w_i - \frac{1}{8} \sum_{a=1}^3 (N_{w\theta})_a l_{bc} (\theta_{sb} - \theta_{sc}) \quad (21)$$

U izrazu (21) N_i ($i=1,2,3$) su funkcije oblika, l_{bc} je duljina stranice između čvorova b i c , θ_{sb} je rotacija u čvoru b oko normale na stranicu između čvorova b i c u ravnini ploče, a $(N_{w\theta})_a$ je funkcija oblika koja daje kvadratnu raspodjelu pomaka w uzduž stranice između čvorova b i c , dok u čvorovima konačnog elementa ima vrijednost nula. Također, a , b i c predstavljaju cikličku permutaciju brojeva 1, 2 i 3. Funkcije $N_{w\theta}$ su definirane kao [2]:

$$\mathbf{N}_{w\theta} = 4[N_1 N_2, \quad N_2 N_3, \quad N_3 N_1] \quad (22)$$

Rotacija oko normale na stranicu $b-c$ u ravnini ploče u čvoru b može se izraziti preko komponenti rotacija θ_{yb} i θ_{xb} (rotacije normale na ploču u čvoru b u smjeru osi x i y , respektivno) uporabom izraza:

$$\theta_{sb} = \cos \psi_{bc} \theta_{yb} - \sin \psi_{bc} \theta_{xb} \quad (23)$$

gdje je ψ_{bc} kut koji čini stranica $b-c$ sa osi x .

Raspodjele rotacija (θ_y i θ_x) prikazane su funkcijama:

$$\theta_y = \sum_{i=1}^3 N_i \theta_{yi} \quad \theta_x = \sum_{i=1}^3 N_i \theta_{xi} \quad (24)$$

gdje su N_i ($i=1,2,3$) funkcije oblika.

Funkcije oblika u (21), (22) i (24) jednake su funkcijama oblika (17), (18) i (19).

Funkcije w , θ_y i θ_x možemo zapisati u matričnom obliku:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} w(x, y) \\ \theta_y(x, y) \\ \theta_x(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & f_{y1} & f_{x1} & N_2 & f_{y2} & f_{x2} & N_3 & f_{y3} & f_{x3} \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \mathbf{a} = \mathbf{N} \mathbf{a} \quad (25)$$

gdje je \mathbf{u} vektor nepoznatih funkcija pomaka i rotacija, \mathbf{N} matrica interpolacijskih funkcija i \mathbf{a} vektor čvornih nepoznanica. U izrazu (25) funkcije $f_{y1}, f_{x1}, f_{y2}, f_{x2}, f_{y3}$ i f_{x3} prikazane su sljedećim izrazima:

$$f_{ya} = \frac{1}{2} l_{ca} N_c N_a \cos \psi_{ca} - \frac{1}{2} l_{ab} N_a N_b \cos \psi_{ab} \quad (26)$$

$$f_{xa} = \frac{1}{2} l_{ab} N_a N_b \sin \psi_{ab} - \frac{1}{2} l_{ca} N_c N_a \sin \psi_{ca} \quad (27)$$

uz cikličku permutaciju indeksa a , b i c za vrijednosti 1, 2 i 3.

Ove su funkcije dobivene uvrštavanjem (23) u (21) i zatim grupiranjem članova uz θ_{y1} , θ_{x1} , θ_{y2} , θ_{x2} , θ_{y3} i θ_{x3} .

3.3. Matrica krutosti, vektor opterećenja i jednadžba ravnoteže konačnog elementa

Kontinuum, odnosno konstrukcija je u ravnoteži kada je prva varijacija ukupne potencijalne energije jednaka nuli. To znači da mora biti u ravnoteži i svaki konačni element. Da bi se odredila potencijalna energija konačnog elementa potrebno je odrediti energiju deformacije i potencijal vanjskog opterećenja konačnog elementa.

Energija deformacije konačnog elementa može se odrediti iz (13) kao [7]:

$$\phi = \frac{1}{2} \mathbf{a}^T \mathbf{K} \mathbf{a} \quad (28)$$

gdje je \mathbf{a} vektor čvornih pomaka i \mathbf{K} matrica krutosti konačnog elementa.

Matrica krutosti konačnog elementa definirana je kao:

$$\mathbf{K} = \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dA \quad (29)$$

gdje je \mathbf{B} matrica veze deformacija – pomak, a \mathbf{C} je konstitutivna matrica.

B-matrica je prikazana sljedećim izrazom:

$$\mathbf{B} = \mathbf{D} \mathbf{N} \quad (30)$$

gdje je \mathbf{D} matrica diferencijalnih operatora i \mathbf{N} matrica interpolacijskih funkcija. Matrica diferencijalnih operatora \mathbf{D} prikazana je kao

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & -\frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} & 0 & -1 \\ \frac{\partial}{\partial x} & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Konstitutivna matrica \mathbf{C} definirana je kao

$$\mathbf{C} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} \frac{t^3}{12} & \nu \frac{t^3}{12} & 0 & 0 & 0 \\ \nu \frac{t^3}{12} & \frac{t^3}{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)t^3}{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-\nu)tk}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-\nu)tk}{2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Potencijal vanjskog opterećenja koje djeluje na konačni element možemo odrediti iz izraza (15). Za element opterećen površinskim opterećenjem (p_{sz}) na čitavoj površini te koncentriranim silama (P_z) i momentima (M_x i M_y) u čvorovima potencijal vanjskog opterećenja dobiva se kao [7]:

$$U = \mathbf{a}^T \mathbf{R} \quad (33)$$

gdje je \mathbf{R} vektor opterećenja konačnog elementa definiran kao:

$$\mathbf{R} = \int_S p_{sz} \mathbf{N}_1^T dS + \mathbf{F} \quad (34)$$

U izrazu (34) \mathbf{N}_1 je prvi redak matrice interpolacijskih funkcija \mathbf{N} , a \mathbf{F} je vektor koncentriranih sila i momenata prikazan izrazom:

$$\mathbf{F}^T = \langle P_{z1} \quad M_{x1} \quad M_{y1} \quad P_{z2} \quad M_{x2} \quad M_{y2} \quad P_{z3} \quad M_{x3} \quad M_{y3} \rangle \quad (35)$$

U vektoru \mathbf{F} indeksi 1, 2 i 3 označavaju broj čvora u kojem djeluje opterećenje.

Ukupna potencijalna energija konačnog elementa može se sada zapisati kao:

$$\Phi = \frac{1}{2} \mathbf{a}^T \mathbf{K} \mathbf{a} - \mathbf{a}^T \mathbf{R} \quad (36)$$

Da bi konačni element bio u ravnoteži, proizvoljna varijacija ukupne potencijalne energije konačnog elementa mora biti jednaka nuli:

$$\delta\Phi = \delta\mathbf{a}^T (\mathbf{K} \mathbf{a} - \mathbf{R}) = 0 \quad \forall \delta\mathbf{a} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{R} \quad (37)$$

Jednadžba (37) naziva se jednadžba ravnoteže ili jednadžba krutosti konačnog elementa.

Definiranje funkcija oblika praktično je najvažniji dio formulacije konačnog elementa, jer se, jedanput kada se odrede, mogu uvrstiti u izraze (29), (34) i (37). Dakle, uvrštavanjem funkcija pomaka (20) u (29), (34) i (37) dobiva se matrica krutosti, vektor opterećenja i jednadžba ravnoteže trokutnog konačnog elementa s linearnom interpolacijom polja pomaka i rotacija, a uvrštavanjem funkcija pomaka (25) u izraze (29), (34) i (37) dobiva se matrica krutosti, vektor opterećenja i jednadžba ravnoteže trokutnog konačnog elementa s vezanom interpolacijom za polje pomaka.

4. Numerička analiza

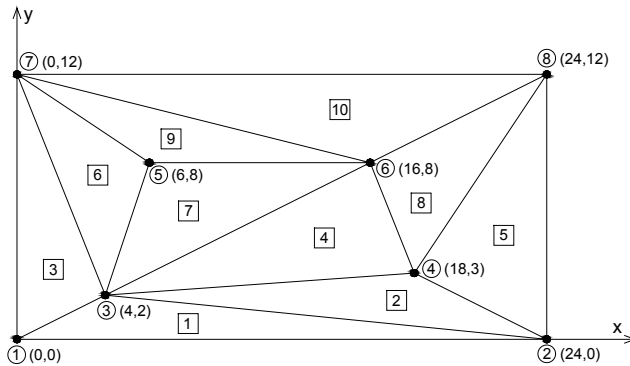
U ovome poglavlju napravljen je patch test i dani su rezultati numeričke analize tipskih testnih problema. Numerička analiza provedena je pomoću programskog paketa MathCAD po uzoru na MathCAD datoteku dr.sc. Vanje Travaša [8].

Cilj je provedenih numeričkih testova analizirati ponašanje trokutnog konačnog elementa s vezanom interpolacijom.

4.1. Patch test

Patch test je test kojim se provjerava sposobnost elementa da prikaže (a) stanje konstantne deformacije, (b) pomak krutog tijela bez deformacije, i (c) kompatibilnost sa susjednim elementima kada prevladava stanje konstantne deformacije [4]. Ako element prolazi patch test rješenja koja se dobivaju proglašćivanjem mreže konačnih elemenata, konvergirat će prema egzaktnom rješenju promatranoga problema [4].

Za oba elementa obrađena u poglavlju 3 učinjen je patch test koji je opisan u nastavku. Provjera sposobnosti reproduciranja stanja konstantne deformacije/naprezanja učinjena je na mreži od deset elemenata, prikazanoj na Slici 5 [9].



Slika 5. Mreža konačnih elemenata podvrgnuta patch testu

Karakteristike ploče su $E = 10^6$, $\nu = 0.3$, i $k = 5/6$, a za debljinu ploče uzete su u obzir dvije vrijednosti: $t=1$ koja odgovara debeloj ploči i $t=0.001$ koja odgovara tankoj ploči.

Test se sastoji od zadavanja poprečnih pomaka i rotacija u čvorovima ploče na Slici 5. Zadani pomaci odgovaraju sljedećim stanjima [9]:

a) stanje konstantnih posmičnih deformacija

$$w = 10^{-3}(x + y), \quad \theta_x = -10^{-3}, \quad \theta_y = 10^{-3}$$

kojem se još dodaju i jednoliko raspodijeljeni momenti m_x i m_y po čitavoj ploči

$$m_x = 641.026t, \quad m_y = -641.026t$$

b) stanje konstantne zakrivljenosti

$$w = -10^{-3}(x + y), \quad \theta_x = -10^{-3}(x + 2y), \quad \theta_y = 10^{-3}(2x + y).$$

Zahtjevi koji moraju biti zadovoljeni su sljedeći: točni poprečni pomaci i rotacije unutrašnjih čvorova za zadane poprečne pomake i rotacije rubnih čvorova i točne deformacije/naprezanja na bilo kojem mjestu unutar ploče. Poprečni pomaci i rotacije čvorova prikazani su prethodnim izrazima, a rezultante naprezanja i njihovi momenti u poprečnim presjecima moraju biti jednaki:

$$\text{a) } M_x = M_y = M_{xy} = 0 \quad \text{i} \quad S_y = S_x = 641.026t \quad \text{za stanje konstantne posmične deformacije,}$$

$$\text{b) } M_x = M_y = 238.095t^3, \quad M_{xy} = 64.103t^3 \quad \text{i} \quad S_x = S_y = 0 \quad \text{za stanje konstantne zakrivljenosti.}$$

Trokutni konačni element s linearnom interpolacijom zadovoljava test konstantne posmične deformacije, a ne zadovoljava test konstantne zakrivljenosti, neovisno o debljini ploče. Prilikom izazivanja stanja konstantne zakrivljenosti u elementima se osim momenata koji imaju točnu vrijednost javljaju i poprečne sile kojih, kao što je navedeno, ne bi smjelo biti, a prilikom zadavanja poprečnih pomaka i rotacija u rubnim čvorovima javljaju se krivi pomaci i rotacije u unutrašnjim čvorovima. Patch test ukazuje da trokutni konačni element s linearnom interpolacijom nije dobar za korištenje u problemima deformiranja pločastih nosača [7] te se stoga taj element u nastavku neće analizirati.

Trokutni konačni element s vezanom interpolacijom prolazi sve navedene testove, neovisno o debljini ploče.

4.2. Tipski testni problemi

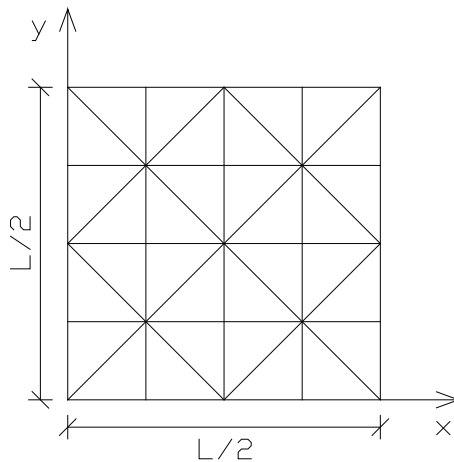
U ovome dijelu analizirana su tri tipska testna problema: kvadratna ploča, kružna ploča i kosa ploča. Numeričke su analize provedene uporabom trokutnih konačnih elemenata s vezanom interpolacijom. Analizirane su debele i tanke ploče. Radi usporedbe su prikazani i rezultati dobiveni elementom $9\beta Q4$ [9] i elementom T3BL [10].

4.2.1. Kvadratna ploča

Analizirana je kvadratna ploča sa stranicama duljine $L = 10$ opisana u [9]. Ploča je opterećena jednoliko raspodijeljenim opterećenjem $q = 1$. U obzir su uzeti sljedeći rubni uvjeti: ploča upeta na sve četiri stranice i slobodno oslonjena ploča na sve četiri stranice. Kod slobodnog oslanjanja razmatrani su SS1 i SS2 rubni uvjeti. Kod SS1 rubnih uvjeta čvorovima na slobodno oslonjenom rubu ploče spriječen je samo vertikalni pomak, a rotacije oko

normale i tangente na oslonjeni rub su slobodne. Kod SS2 rubnih uvjeta čvorovi na oslonjenom rubu ploče imaju spriječen vertikalni pomak i rotacije oko normale na rub, dok su rotacije oko tangente ruba slobodne. Razmatrane su debele ($L/t = 10$) i tanke ($L/t = 1000$) ploče, gdje t označava debljinu ploče. Materijalne su karakteristike ploče $E = 10,92$ i $\nu = 0.3$, koeficijent k iznosi $5/6$, a C_b je definiran kao $C_b = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$.

Kvadratna je ploča analizirana koristeći četiri mreže različite gustoće, nazvane mreža 2x2, 4x4, 8x8 i 16x16. Na Slici 6 prikazana je geometrija mreže 4x4. Analizirana je četvrtina ploče. Rezultati koji se odnose na element 9βQ4 i element T3BL dobiveni su mrežama koje imaju broj čvorova jednak broju čvorova mreže 16x16.



Slika 6. Mreža 4x4, gornja četvrtina kvadratne ploče

Napominje se da su konačni rezultati u obrađenim testnim problemima ovisni, osim o gustoći mreže, i o geometriji mreže. To znači da različit raspored elemenata kod istog rasporeda čvorova daje različite rezultate.

U Tablici 1 prikazane su vrijednosti poprečnih pomaka i momenata savijanja u sredini upete ploče dobivene upotrebom elementa s vezanom interpolacijom. Element s vezanom interpolacijom ponaša se dobro u slučaju debele i tanke ploče. Može se uočiti da sa progušćivanjem mreže konačnih elemenata dobivena rješenja konvergiraju referentnom rješenju u oba slučaja debljine ploče. Brzina konvergiranja nije velika. Element se ponaša podjednako dobro i u slučaju slobodno oslonjene ploče, što se može uočiti iz Tablice 2.

Tablica 1. Poprečni pomak i moment na sredini upete kvadratne ploče

Mreža	$L/t = 10$		$L/t = 1000$	
	$w/\left(\frac{qL^4}{100C_b}\right)$	$M/\left(\frac{qL^2}{100}\right)$	$w/\left(\frac{qL^4}{100C_b}\right)$	$M/\left(\frac{qL^2}{100}\right)$
2x2	0.084715	1.11035	0.000021	0.00034
4x4	0.139256	2.07501	0.093471	1.59102
8x8	0.147865	2.26152	0.117949	2.11057
16x16	0.149828	2.30559	0.124724	2.25459
9βQ4	0.150638	2.32770	0.126714	2.29888
T3BL	0.150131	2.30930	0.126092	2.28031
Referentno rješenje	0.14990*	2.3100*	0.12653**	2.2905**

* Rješenja za debele ploče [9]

** Rješenja za granični slučaj tanke ploče [9]

Tablica 2. Poprečni pomak i moment na sredini slobodno oslonjena kvadratne ploče

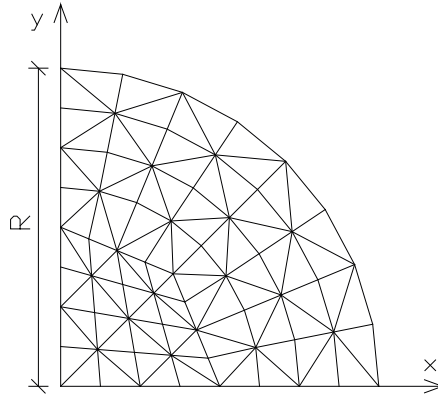
Mreža	$L/t = 10$ (SS1)		$L/t = 10$ (SS2)		$L/t = 1000$ (SS2)	
	$w/\left(\frac{qL^4}{100C_b}\right)$	$M/\left(\frac{qL^2}{100}\right)$	$w/\left(\frac{qL^4}{100C_b}\right)$	$M/\left(\frac{qL^2}{100}\right)$	$w/\left(\frac{qL^4}{100C_b}\right)$	$M/\left(\frac{qL^2}{100}\right)$
2x2	0.393022	3.85911	0.367257	3.63014	0.325527	3.38545
4x4	0.433873	4.69574	0.415495	4.53030	0.386272	4.40109
8x8	0.450803	4.96364	0.424661	4.72891	0.401261	4.68860
16x16	0.458273	5.05689	0.426653	4.77410	0.404997	4.76346
9βQ4	0.460942	5.09577	0.427305	4.79586	0.406242	4.79585
T3BL	0.458561	5.07377	0.426869	4.78940	0.405871	4.78282
Ref. rj.			0.42728*	4.7886*	0.40624*	4.7886*

* Navierovo rješenje [9]

4.2.2. Kružna ploča

Analizirana je upeta i slobodno oslonjena (SS1) kružna ploča. Radijus ploče je $R = 5$, a ploča je opterećena jednoliko raspodijeljenim poprečnim opterećenjem $q = 1$ [9]. U obzir je uzeta debela ($R/t = 5$) i tanka ($R/t = 50$) ploča. Materijalne su karakteristike iste kao u primjeru kvadratne ploče. Modelirana

je četvrtina ploče. Upotrijebljene su tri mreže različite gustoće. Najrjeđa mreža se sastoji od 6 elemenata, zatim slijede mreža od 24 elemenata i mreža od 96 elemenata (Slika 7).



Slika 7. Mreža od 96 elemenata, gornja desna četvrtina kružne ploče

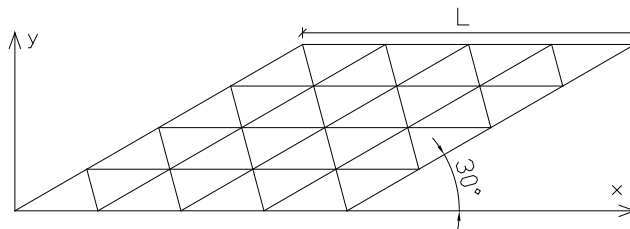
U Tablici 3 prikazane su vrijednosti poprečnog pomaka i momenta savijanja u sredini ploče dobivene numeričkom analizom. Može se uočiti dobro ponašanje elementa za slučaj debele i tanke ploče. Kod upete ploče rezultati konvergiraju prema točnom rješenju sporije nego kod slobodno oslonjene ploče. Rezultati koji se odnose na element $9\beta Q4$ i element T3BL dobiveni su mrežama koje imaju broj čvorova jednak mreži od 96 elemenata.

Tablica 3. Poprečni pomak i moment na sredini upete i slobodno oslonjene (SS1) kružne ploče

Broj elemenata	$R/t = 5$				$R/t = 50$			
	Upeti rub		SS1		Upeti rub		SS1	
	w	M	w	M	w	M	w	M
6	6.806	1.156	40.166	4.641	427.9	0.093	34153	3.682
24	10.377	1.813	41.207	5.016	5179.5	1.201	38658	4.811
96	11.254	1.969	41.495	5.114	9170.1	1.919	39643	5.091
$9\beta Q4$			41.540	5.162			39779	5.161
T3BL	11.302	1.978	41.556	5.124	9523.7	1.977	39785	5.124
Točno rješenje	11.551	2.031	41.599	5.156	9783.5	2.031	39832	5.156

4.2.3. Kosa ploča

Promatrana kosa ploča ima četiri stranice duljine $L = 100$, slobodno je oslonjena (SS1) na sve četiri stranice i opterećena je jednoliko raspodijeljenim opterećenjem $q = 1$ [9]. Dvije kose stranice ploče zatvaraju sa osi x kut od 30 stupnjeva. Materijalne su karakteristike iste kao u primjeru kvadratne ploče. Dvije vrijednosti debljine ploče su uzete u obzir: $t = 1$ i $t = 0.1$. Geometrija upotrijebljenih mreža prikazana je na Slici 8. Broj u oznaci mreže upućuje na broj elementarnih rombova u mreži od kojih se svaki sastoji od po dva trokutna konačna elementa.



Slika 8. Kosa ploča, mreža 4x4

Rezultati dobiveni u središtu ploče za različite mreže i različite debljine ploče prikazani su u Tablici 4.

Tablica 4. Poprečni pomak i momenti na sredini slobodno oslonjene (SS1) kose ploče

Mreža	L/t = 100			L/t = 1000		
	w/a	M_1/b	M_2/b	w/a	M_1/b	M_2/b
4x4	0.393156	1.67534	0.99468	0.393999	1.66934	1.01734
8x8	0.376569	1.81341	1.10761	0.305318	1.57819	1.11531
16x16	0.403524	1.88770	1.09378	0.285606	1.60587	1.05269
32x32	0.416390	1.92756	1.11238	0.330657	1.71740	1.00851
9βQ4	0.426964	1.95929	1.14868	0.424505	1.95315	1.14322
T3BL	0.419586	1.93657	1.12122	0.412734	1.91781	1.09998
Referentno rješenje	0.42300*			0.4080**	1.910**	1.080**

* Trodimenzionalno rješenje Babuške i Scapolle [9]

** Morleyevo rješenje za granični slučaj tanke ploče [9]

$$a=q \cdot L^4 / (100 \cdot C_b), \quad b=q \cdot L^2 / 100$$

Element s vezanom interpolacijom se, u ovome primjeru, za slučaj ploče debljine $t = 0.1$ ponaša lošije nego u dva prethodna primjera. Kod ploče debljine $t = 0.1$ element se ponaša lošije nego kod ploče debljine $t = 1$. Povećanjem debljine ploče dolazi do poboljšanja rezultata.

5. Zaključak

Prikladnim povezivanjem rotacija čvorova s poprečnim pomakom čvorova [2, 3] u izrazu za raspodjelu poprečnog pomaka (w) dobiven je iz trokutnog konačnog elementa s linearnom interpolacijom konačni element s vezanom interpolacijom za polje pomaka. Element s vezanom interpolacijom prolazi patch test i pokazuje relativno dobro ponašanje kroz sve tipske testne probleme, a kod debele ploče ponaša se malo bolje nego kod tanke ploče. Na temelju prolaska patch testa ustanovljeno je da se element s vezanom interpolacijom ponaša dobro u slučaju tanke i debele ploče te da u oba slučaja progušćivanje mreže konačnih elemenata rezultira konvergencijom rezultata ka točnome rješenju, što je i pokazano na tipskim testnim problemima.

Zahvala. Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta br. 114-0000000-3025 (Unapređenje točnosti nelinearnih grednih elemenata s neograničenim 3D rotacijama) provedenog uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.

6. Literatura

- [1] J. Brnić, M. Čanadija. *Analiza deformabilnih tijela metodom konačnih elemenata*. Rijeka, 2009.
- [2] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics, Sixth edition*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [3] Y. J. Liu, H. R. Riggs. The MIN-N family of pure-displacement, triangular, Mindlin plate elements. *Structural Engineering and Mechanics*, **19**: 297-320, 2005.
- [4] R. D. Cook. *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [5] F. Auricchio, R. L. Taylor. A triangular thick plate finite element with an exact thin limit. *Finite elements in Analysis and Design*, **19**: 57-68, 1995.
- [6] K. J. Bathe. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, New Jersey, 1996.

-
- [7] T. Mudrić. *Trokutni konačni element za analizu srednje debelih ploča i njegova primjena u linearnoj statičkoj analizi*. Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2010.
- [8] V. Travaš. Osobna komunikacija, 2010.
- [9] S. de Miranda, F. Ubertini. A simple hybrid stress element for shear deformable plates. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **65**: 808-833, 2006.
- [10] R. L. Taylor, F. Auricchio. Linked interpolation for Reissner-Mindlin plate elements: Part II – a simple triangle. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **36**: 3057-3066, 1993.

USPOREDBA PRIMJENE UOBIČAJENIH I SPECIJALIZIRANIH SOFTVERA U UPRAVLJANJU GRAĐEVINSKIM PROJEKTIMA

COMPARISON OF COMMON AND SPECIALIZED SOFTWARE APPLICATION IN CONSTRUCTION PROJECT MANAGEMENT

**Ivan Marović, Ivona Gudac, Nataša Turina, Diana Car-Pušić,
Karmela Čuljak**

***Sažetak.** Svaki se graditeljski projekt može opisati kao nerutinski, neponovljivi i jedinstveni poduhvat koji ima zasebne vremenske, financijske i tehničke izvedbene ciljeve. Priprema koja prethodi realizaciji projekta mora se provesti temeljito i stručno jer će samo takav pristup omogućiti ostvarenje ciljeva projekta. U tome nam može pomoći integrirano programsko rješenje koje u značajnoj mjeri rješava pitanja organizacije, planiranja i kontrole izvedbe projekata. U radu je, za potrebe upravljanja projektima, dana usporedba dvaju najčešćih načina rada s računalom i računalnim softverima u hrvatskoj građevinskoj praksi. Prvi, konvencionalni način obuhvaća rad na računalu s osnovnim dijelovima MS Office paketa (MS Word i MS Excel) te MS Project-om, dok se u radu sa specijaliziranim softverima obuhvaća rad u integriranom programskom paketu. Rad u specijaliziranom softveru za upravljanje projektima, zbog integriranosti baza normativa rada, materijala i strojeva te kalkulacija jediničnih cijena, od pomoći je svim sudionicima građenja jer nudi bržu izradu ponuda, situacija, građevinskih knjiga, gantograma, histograma, S-krivulja i ostale dokumentacije neophodne za uspješno vođenje gradilišta kao i za upravljanje projektima. Navedene karakteristike omogućavaju izradu troškovno i vremenski učinkovitijeg plana organizacije građenja.*

***Ključne riječi:** upravljanje projektima, građevinski projekt, hrvatska građevinska praksa, primjena uobičajenih softvera, primjena specijaliziranih softvera, usporedba*

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: {ivan.marovic,ivona.gudac,nturina,dipusic,karmela.culjak}@gradri.hr

Abstract. *Every construction project can be described as non-routine, unrepeatable and unique venture with distinct time, financial and technical goals. Preparation which is prior to project realization must be thoroughly and professionally carried out because only such approach will enable achievement of project's goals. This can be accomplished through distinct program solutions which significantly resolve matters of organization, planning and control of project performance. For project management purposes, this paper compares two most common ways of using computers and software in Croatian construction industry practice. The first, common way includes work on a computer with basic elements of MS Office package (MS Word and MS Excel) and MS Project, while work in specialized software includes work in integral program package. Working with specialized project management software is helpful for all the participants in construction business because it offers access to the previously created work, material and machine standard databases and unit price calculations enabling a quicker creation of bills of quantities, invoices, books of quantities, Gantt charts, histograms, S-curves and other documentation necessary for successful construction site management as well as project management. These characteristics enable creation of a more cost and time efficient construction management plan.*

Key words: *project management, project, Croatian construction practice, application of common software, application of specialized software, comparison*

1. Uvod

Svaki se graditeljski projekt može opisati kao nerutinski, neponovljivi i jedinstveni poduhvat koji ima zasebne vremenske, financijske i tehničke izvedbene ciljeve. Poznata je činjenica iz proizvodne prakse da kvalitetna priprema rješava velik dio problema na proizvodnji određenog proizvoda, što bi u graditeljskoj sferi predstavljalo izradu projekta organizacije građenja (POG). U radu [1] prikazana je važnost POG-a u pripremi izvođenja građevinskih radova čija izrada omogućuje brzo, kvalitetno i ekonomično građenje. Navedeno je da su ciljevi projekta određeni sadržajem, vremenom, troškovima i kvalitetom, no bitno je napomenuti da su određeni i različitim potrebama i očekivanjima sudionika u projektu.

Glavni razlog nastanka i razvoja upravljanja projektima jest pokušaj standardizacije postupaka i procesa u rješavanju složenih inženjerskih problema. U formalnome smislu, razvoj je započeo 50-ih godina prošlog stoljeća te se nastavio do danas [2, 3].

Upravljanje projektima odvija se kroz pet osnovnih funkcija: planiranje, organiziranje, kadrovsko ekipiranje, kontrolu i vođenje [3], uz motivaciju svih sudionika da se projektni ciljevi ostvare sigurno, uz efikasan utrošak dodijeljenih

resursa, unutar zadanih rokova i proračuna, prema zadanim tehničkim uvjetima, na zadovoljstvo naručitelja i sa dobiti za sve sudionike [4].

Graditeljski projekti obiluju velikim brojem radnih zadataka i troškova. Stoga je posao upravljanja projektom složen i odgovoran. Razvoju i oblikovanju načina upravljanja projektima te njegovom pojednostavljenju u značajnoj je mjeri pridonio razvoj informacijskih i komunikacijskih tehnologija.

U radu je dana usporedba dvaju načina rada s računalom i računalnim softverima koji se najčešće susreću u domeni upravljanja građevinskim projektima u hrvatskoj građevinskoj praksi. Prvi, uobičajeni način obuhvaća rad na računalu s većim brojem samostalnih, međusobno nepovezanih softvera, dok drugi način predstavlja rad u integriranom programskom paketu.

2. Definiranje problema

Korištenje informacijskih i komunikacijskih tehnologija (ICT) u graditeljstvu Republike Hrvatske zadnjih se godina značajno širi. Do sada se korištenje ICT-a pri upravljanju projektima u graditeljstvu u najvećoj mjeri odnosilo, uz korištenje CAD softverskih paketa, na primjenu različitih MS Office aplikacija te niza različitih samostalnih alata za izračune količina, trajanja te za komunikaciju među sudionicima u projektu. Prema iskustvu iz prakse, uporaba velikog broja različitih aplikacija i alata u okruženju koje je izrazito dinamičko s velikim brojem informacija relativno je nepraktična, spora i netransparentna.

Uporaba spomenutih aplikacija i alata orijentirana je prema korisniku te uskom krugu sudionika projekta s kojima on komunicira, što rezultira izrazito ograničenom i slabom propusnošću velike količine informacija nužnih za donošenje odluka. Takav uobičajeni pristup planiranja i kontrole napretka izvođenja pomoću različitih linijskih planova i metode kritičnog puta i dalje predstavlja paket alata koje voditelji projekata uobičajeno koriste za planiranje.

Sa stajališta donositelja odluke, takav pristup ne donosi sve ključne informacije potrebne za pravovremeno i adekvatno odlučivanje. Pritisci okoline i stjecanje konkurentskih prednosti u graditeljstvu natjerali su tvrtke da preispitaju svoje upravljačke i organizacijske tehnike te da unaprijede svoj „modus operandi“ [5]. Planiranje projekata i njihova kontrola dvije su elementarne zadaće upravljanja projektima, dobro upravljanje kojima se direktno odražava na uspješnost projekta u cjelini. Činjenica da svega 33% graditeljskih projekata zadovolji zahtjeve u pogledu rokova, dok 66% zadovolji troškovne zahtjeve [5] ukazuje na potrebu stjecanja novih vještina ICT-a u području upravljanja građevinskim projektima. Jedan takav kvalitativni iskorak

pružaju integrirani programski paketi koji nude cjelovito rješenje za potrebe upravljanja projektima kroz sve faze te svojim konceptom pružaju mogućnost veće uspješnosti upravljanja projektima.

Na hrvatskom građevinskom tržištu postoji niz specijaliziranih softvera za upravljanje projektima ili djelomično upravljanje projektima u graditeljstvu (npr. Oracle's Primavera, GALA construction software, Kran, Adriakod, MS Project i dr.). Od spomenutih specijaliziranih softvera jedino se kod Oracle's Primavera i GALA construction software-a cjelokupno planiranje i praćenje (što predstavlja cjelovitu podršku upravljanja projektima) izvodi unutar integriranog sustava koji posjeduje centralne baze podataka, u odgovarajućem obimu dostupne svim sudionicima projekta, dok ostali softveri pružaju tek djelomičnu podršku upravljanju projektima.

Zbog svoje praktičnosti, jednostavnosti korištenja kao i okrenutosti korištenju na gradilištu, što je prepoznalo i samo tržište (koristi se u više od 150 tvrtki u Hrvatskoj) te činjenice da je nastao i razvijao se u Hrvatskoj, GALA construction software je u ovom radu uzet kao predstavnik integriranog specijaliziranog programskog paketa.

2.1. Primjer – stambeni objekt

Prednosti i nedostaci praktične primjene specijaliziranog softvera pri upravljanju projektima, kao i usporedba s uobičajenim načinom planiranja i praćenja projekata, prikazani su na primjeru stambene građevine obrađene seminarskim radom [6] napravljenim akademske godine 2009./10. na kolegiju Stručna praksa.

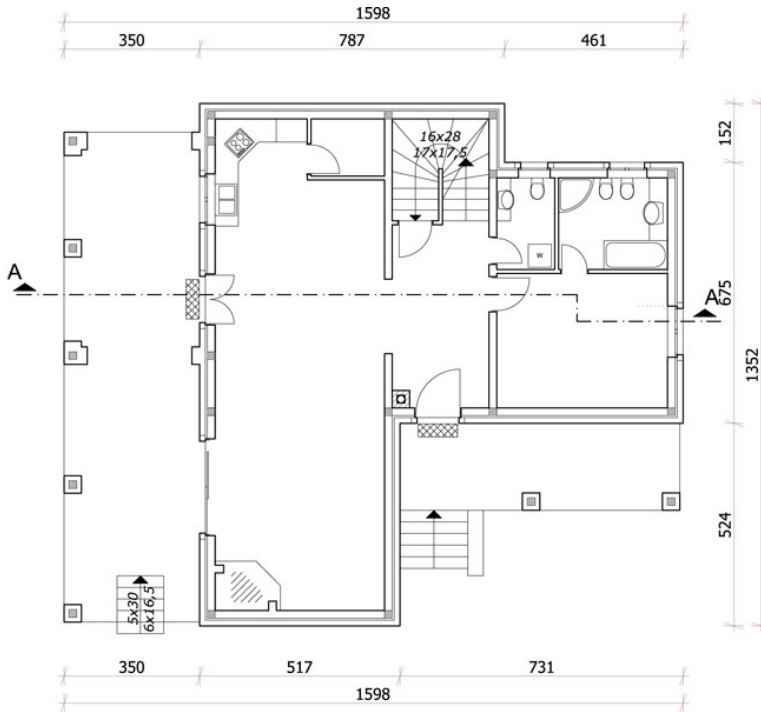
Prikazani nacrti (Slika 1, 2, 3) navedenog objekta predstavljaju dio podloge za izradu POG-a na sveučilišnim preddiplomskim kolegijima Organizacija i tehnologija građenja te Ekonomika građenja Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Dok je kroz seminare kolegija na spomenutom primjeru teže dati tehnička rješenja problema POG-a, u radu će ovaj jednostavni primjer poslužiti kao podloga da se lakše obrazloži idejni i konceptualni pristup rješavanja problema upravljanja projektima.

Na Slici 1 dan je prikaz građevine na geodetskoj podlozi s ispisom broja čestice na kojoj se gradi i okolnih čestica. Smještaj građevine na približno pravokutnoj građevnoj čestici površine 802,0 m² uvjetovan je građevnim pravcem koji je, prema odredbama prostorno planske dokumentacije i rješenja o uvjetima građenja, određen na udaljenosti od 5,0 m od regulacijskog pravca i minimalno 3,0 m od preostalih granica građevne čestice.

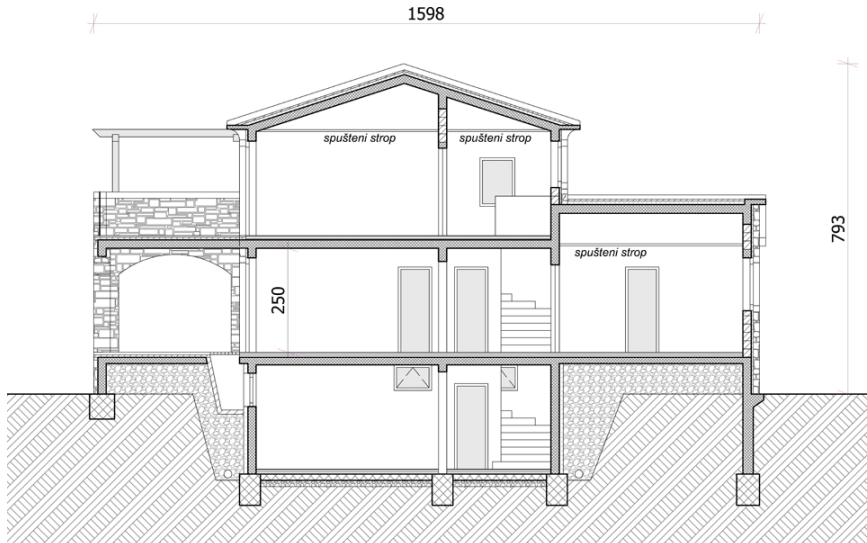


Slika 1. Situacija građevine na geodetskoj podlozi

Sama građevina je troetažna obiteljska kuća (podrum, prizemlje, kat) s jednom stambenom jedinicom čije je arhitektonsko oblikovanje primjenom građevnih materijala, oblika i detalja usvojeno po uzoru na tradicijsko. Građevina je razvedenog tlocrtnog oblika te se sastoji od jednog središnjeg dominantnog volumena koji se proteže kroz sve etaže i pripojenih prizemnih zatvorenih prostora i natkrivenih terasa (Slika 2). Korisna svijetla visina stambene etaže iznosi minimalno 2,50 m, dok je maksimalna visina građevine (mjereno od najniže kote zaravnatog i uređenog terena do najviših krovnih ploha-sljemena) 7,93 m, kao što je prikazano na Slici 3.



Slika 2. Karakteristični tlocrt objekta (prizemlje)



Slika 3. Karakteristični presjek objekta (presjek A-A)

3. Organizacijsko planiranje i praćenje projekata uobičajenim načinom i primjenom specijaliziranog softvera

Na navedenom primjeru stambene građevine prikazat će se uobičajeni način planiranja i praćenja projekta kao i korištenje specijaliziranog programskog paketa. Navedeno će predstavljati etalon za kvalitativnu usporedbu te prikaz prednosti i nedostataka razmatranih načina planiranja i praćenja projekata.

Uobičajeni pristup korištenja ICT-a u graditeljstvu odnosi se na primjenu većeg broja različitih samostalnih aplikacija (MS Office, CAD softverskih paketa te različitih samostalnih alata) čijom se integracijom izlaznih podataka dobiva krajnji proizvod, tj. projekt organizacije građenja. Pri izradi POG-a navedenim načinom, zbog nedostatka međusobne direktne povezanosti dokumenata, prisutna su ograničenja u brzini rada i sigurnosti (s aspekta točnosti i usklađenosti iskaza količina, troškova, vremena i ostalog). Kolaboracija među sudionicima u izradi projekta je ograničena na izradu pojedinog (manjeg) dijela projekta, slanja putem elektroničke pošte ili nekog drugog komunikacijskog kanala te konačno usklađivanje i integraciju u sam projekt, što zbog rascjepkanosti postupaka i naknadne integracije lako može dovesti do pogreške.

U slučaju korištenja specijaliziranih softvera za upravljanje projektima, cjelokupno planiranje i praćenje se izvodi unutar integriranog sustava u kojem su svi elementi POG-a međusobno direktno (dvosmjerno) povezani. Promjena elemenata jednog dokumenta direktno uvodi promjenu u svim dokumentima.

Posebno treba naglasiti da je konvencionalni način korištenja pojedinačnih softverskih aplikacija dostatan za izradu POG-a, ali teško može zadovoljiti zahtjevima cjelovitog upravljanja, pogotovo upravljanja složenim projektima.

U nastavku će biti prikazani primjeri planiranja i praćenja projekata konvencionalnim načinom te primjenom specijaliziranog softverskog paketa za sljedeće dijelove projektne dokumentacije: troškovnik, dokaznica, analiza jedinične cijene te vremenski plan - gantogram.

Ovi su elementi odabrani zbog svoje izrazite važnosti u svim fazama projekta. Troškovnik i dokaznica mjera predstavljaju sastavni dio projektne dokumentacije koji se prvotno uobičajeno izrađuju u fazi projektiranja. Analize jediničnih cijena i izrada operativnih planova pripadaju pripremnom dijelu faze građenja, odnosno POG-u koji se izrađuje najprije na idejnom, a zatim na izvedbenom nivou. Naime, elemente idejnog POG-a izvođačke tvrtke izrađuju već u fazi davanja ponude kako bi se vremenski i financijski ponude mogli pravilno sagledati.

Troškovnik građevinskih radova je dokument kojim se procjenjuje ukupna vrijednost nekog posla ili grupe poslova u graditeljstvu i predstavlja sastavni dio ugovorne dokumentacije svakog građevinskog projekta. To je vrlo važan dokument za sve sudionike u projektu, a osobito za investitora i izvođača radova. Troškovnik predstavlja osnovu za obračun cijene koji je posebno važan u slučaju obračuna radova po jedinici mjere. U tom slučaju su količine radova u troškovniku izračunate na temelju nacrtne dokumentacije, a nakon izvedbe obračunavaju se stvarno izvršeni radovi. Financijski iskaz dobiva se uz pomoć ugovorenih jediničnih cijena iskazanih u troškovniku.

Kvaliteta troškovnika očituje se najviše u tome da se svi radovi predvide dovoljno detaljno kako bi se smanjio rizik od izvođenja dodatnih i vanstroškovničkih radova koje treba svesti na prihvatljivi minimum. Osnova svakog dobrog troškovnika je točan i jasan tekstualni opis jer on pokazuje koje je sve elemente radnog procesa projektant ili izvođač (ovisno o tome tko piše troškovnik) predvidio.

Postojanje dodatnih količina i vanstroškovničkih stavki već je samo po sebi osjetljivo pitanje koje se dodatno potencira u slučaju loše sastavljenog troškovnika, što utječe na veću vjerojatnost pojave nesporazuma koji mogu prouzročiti sporove između sudionika projekta, a posebno između investitora i izvođača radova.

Jedinične cijene pojedinih radova koje se unose u troškovnik određuju se analizama jediničnih cijena se nekom od uobičajenih metoda (obračunskog faktora ili prodajne satnice), proračunom prema odabranoj tehnologiji i stvarnim cijenama resursa koji se koriste u svakoj pojedinoj operaciji od strane izvođača. Vremenski planovi se izrađuju na temelju do sada opisanih dokumenata, a zatim se u fazi izvođenja projekta prate, kontroliraju i revidiraju.

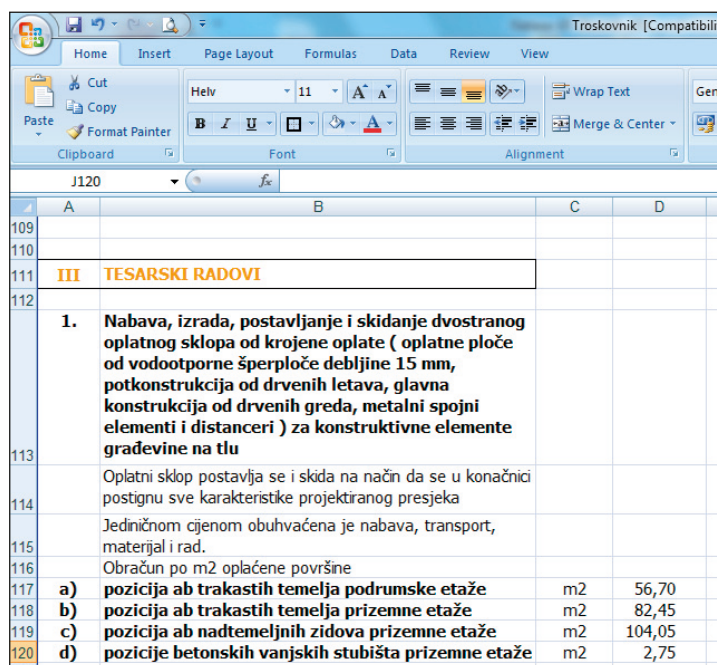
3.1. Uobičajeni način planiranja i praćenja projekta

Pojedinačni dijelovi dokumentacije projekata građenja u praksi se najčešće izrađuju nestandardizirano, na različite načine, u različitim fazama i od različitih sudionika projekta. Pri tome se sudionici koriste s više uobičajenih softverskih alata, kao što su MS Word, MS Excel, različiti CAD softverski paketi, MS Project i slično te se to može smatrati uobičajenim načinom parcijalnog planiranja i praćenja projekata u praksi.

U ovom poglavlju rada bit će opisana izrada troškovnika, dokaznice, analize cijena i gantograma primjenom uobičajenih, nespecializiranih softvera. Nakon kratkog opisa načina izrade jedinog elementa projektne dokumentacije, procijenit će se prednosti i nedostaci korištenja pojedinih aplikacija u tu svrhu.

3.1.1. Troškovnik

Troškovnik se u praksi najčešće izrađuje pomoću MS Office aplikacija, MS Word-a ili MS Excel-a, odnosno njihovom kombinacijom. Navedene aplikacije su izrazito raširene i prilagođene korisnicima te je njihovo korištenje jednostavno. Iako se konačni ispis troškovnika izrađenog pomoću MS Word-a ili MS Excel-a gotovo i ne razlikuje, postupak rada je bitno drugačiji. Dok je MS Word alat primarno namijenjen oblikovanju i obradi teksta, MS Excel je specijalizirani alat za tablične proračune koji pruža znatno više mogućnosti. Na Slici 4 prikazan je primjer troškovničke stavke, preuzet iz primjera stambenog objekta predloženog u radu [6], izrađene u MS Excel-u.



	A	B	C	D
109				
110				
111	III TESARSKI RADOVI			
112	1. Nabava, izrada, postavljanje i skidanje dvostranog oplatnog sklopa od krojene oplate (oplatne ploče od vodootporne šperploče debljine 15 mm, potkonstrukcija od drvenih letava, glavna konstrukcija od drvenih greda, metalni spojni elementi i distanceri) za konstruktivne elemente građevine na tlu			
113	Oplatni sklop postavlja se i skida na način da se u konačnici postignu sve karakteristike projektiranog presjeka			
114	Jediničnom cijenom obuhvaćena je nabava, transport, materijal i rad.			
115	Obračun po m2 oplatacne površine			
116				
117	a) pozicija ab trakastih temelja podrumске etaže	m2	56,70	
118	b) pozicija ab trakastih temelja prizemne etaže	m2	82,45	
119	c) pozicija ab nadtemeljnih zidova prizemne etaže	m2	104,05	
120	d) pozicije betonskih vanjskih stubišta prizemne etaže	m2	2,75	

Slika 4. Primjer troškovničke stavke izrađene pomoću MS Excel aplikacije

U današnje vrijeme gotovo prevladavajući način pisanja troškovnika korištenjem MS Office aplikacija u građevinskoj praksi omogućio je znatne olakšice u radu.

Već na osnovnom nivou korištenja MS Excel, za razliku od MS Word-a, nudi znatne prednosti zbog načina rada s tablicama u kojima se pomoću unesenih izraza automatski računaju vrijednosti u troškovniku (npr. količine po stavkama, ukupne količine radova i rekapitulacija radova). Pravilno zadani izrazi omogućavaju automatsku promjenu svih povezanih vrijednosti pri promjeni bilo kojeg od ulaznih parametara.

Korištenje ovih aplikacija pridonijelo je olakšanoj izradi troškovnika omogućujući kopiranje i ponovno korištenje jednom napisanih stavki i manjih ili većih dijelova troškovnika uz jednostavan unos promjena te jednostavan način razmjene dokumenta između različitih sudionika projekta. Također je moguće izraditi predloške koji će se kasnije mijenjati i prilagođavati novim poslovima. U slučaju izrade troškovnika u MS Excel-u, osim navedenih prednosti, automatiziraju se izračuni, a ukupne cijene po vrstama radova se mogu vrlo efektno i jasno vizualno predočiti. Oba su programa korisnički orijentirana i jednostavna za korištenje uz vrlo kratku obuku korisnika.

Iako MS Excel omogućuje obradu troškovničkih stavki, a kasnije i analizu cijena pomoću baza podataka, prosječni korisnici vrlo se rijetko koriste naprednim funkcijama ove aplikacije. Za rad pomoću baza podataka potrebno je baze unaprijed kreirati, što u početku može zahtijevati prilično vremena i truda, no u daljnjem radu ima pozitivan utjecaj na izradu troškovnika u pogledu vremena i kvalitete.

Pojedine dijelove dokumentacije također je moguće pohraniti na jednom mjestu (datotečnom poslužitelju) te će oni na taj način biti dostupni svim umreženim korisnicima. Ovakva je komunikacija jednosmjerna, odnosno promjene osnovnih podataka na poslužitelju ne utječu na ranije preuzete podatke. Isto tako, nije omogućen istovremeni rad na dokumentu pohranjenom na datotečnom poslužitelju od strane više korisnika.

Opisani softveri nisu specijalizirani za graditeljstvo te ne pružaju dodatne mogućnosti povezivanja zasebnih dokumenata bez poznavanja rada softvera i svih njegovih mogućnosti na naprednom nivou.

3.1.2. Dokaznica

Dokaznica mjera ili predmjer radova je dio tehničke dokumentacije u kojem su proračunate količine radova po pojedinim stavkama koje se zatim nose u troškovnik. Dokaznice se na uobičajeni način također rade najčešće pomoću MS Word ili MS Excel aplikacija. Kod složenijih izračuna preporuča se u dokaznice dodati skice priređene u nekim od dostupnih CAD softverskih paketa i nakon toga uklopiti kao slike u MS Word ili MS Excel datoteku. Prednosti i nedostaci opisani kod izrade troškovnika javljaju se i pri izradi dokaznice.

3.1.3. Analiza jedinične cijene

Kalkulacija troškova po pojedinim stavkama također se može izvršiti pomoću obrazaca za analizu jediničnih cijena koje možemo pripremiti pomoću MS Word-a ili MS Excel-a. Jednom pripremljene analize za različite radove

moгу se kasnije uz manje preinake koristiti za neke druge troškovnike ili se mogu koristiti samo gotovi obrasci.

U slučaju izrade analiza jediničnih cijena, puno je praktičnija upotreba MS Excel-a od MS Word-a zbog toga što je osnovna namjena ovog programa tablično računanje. Pravilnim povezivanjem ćelija unutar tablice za analizu cijena pomoću odgovarajućih formula znatno se olakšava i skraćuje postupak izrade analiza jediničnih cijena, a nadalje i troškovnika.

Prednosti i nedostaci opisani kod izrade troškovnika javljaju se i pri izradi analiza jediničnih cijena. Na Slici 5 prikazan je primjer analize jedinične cijene za jednu stavku troškovnika iz primjera navedenog u radu, izrađene pomoću MS Excel-a.

ANALIZA JEDINIČNE CIJENE

Vrsta radova: Tesarski radovi Broj stavke u troškovniku: III.1./d

Opis stavke:
 Nabava, izrada, postavljanje i skidanje dvostranog oplatnog sklopa od krojene oplata (oplatne ploče od vodootporne šperploče debljine 15 mm, potkonstrukcija od drvenih letava, glavna konstrukcija od drvenih greda, metalni spojni elementi i distanceri) za konstruktivne elemente građevine na tlu dimenzija 50*100 cm i pratećeg pribora:
 d/ pozicije betonskih vanjskih stubišta prizemne etaže.

Jed. m²

A. Materijal, sredstva i usluge

Br.	Normativ	Vrsta materijala	Normirana količina	Cijena	Ukupno
1.	TE.03.710./2	šperploča 15 mm	0,002 m ³	6.350,00	12,70
2.	TE.03.710./2	drvene letve i gredice	0,007 m ³	1.300,00	9,10
3.	TE.03.710./2	čavli	0,100 kg	8,00	0,80
4.	TE.03.710./2	ulje za premaz	0,100 kg	7,00	0,70
A. Ukupno materijal					23,30

B. Troškovi rada

Br.	Normativ	Struka i kvalif.	Normirani utrošak	Satnica	Ukupno
1.	TE.03.710./2	PKR	1,20	22,00	26,40
2.	TE.03.710./2	KVR	1,50	25,00	37,50
B. Ukupno rad					63,90

Obračunski faktor f = 4,00

Cijena = A + B × f = **278,90**

Slika 5. Primjer analize jedinične cijene izrađene pomoću MS Excel aplikacije

3.1.4. Vremenski plan

Planiranje vremena predstavlja jedno od osnovnih načela organizacije rada. U upravljanju građevinskim projektima koriste se različite vrste dinamičkih planova koji omogućavaju planiranje i praćenje provedbe projekta, od kojih je najraširenija upotreba linijskog vremenskog plana - gantograma. Osnovni preduvjet bilo koje tehnike planiranja je podjela radova na aktivnosti koje se kod gantograma prikazuju kao linije duljine proporcionalne procijenjenom vremenu trajanja te njihovo povezivanje logičkim vezama organizacijske i tehnološke naravi.

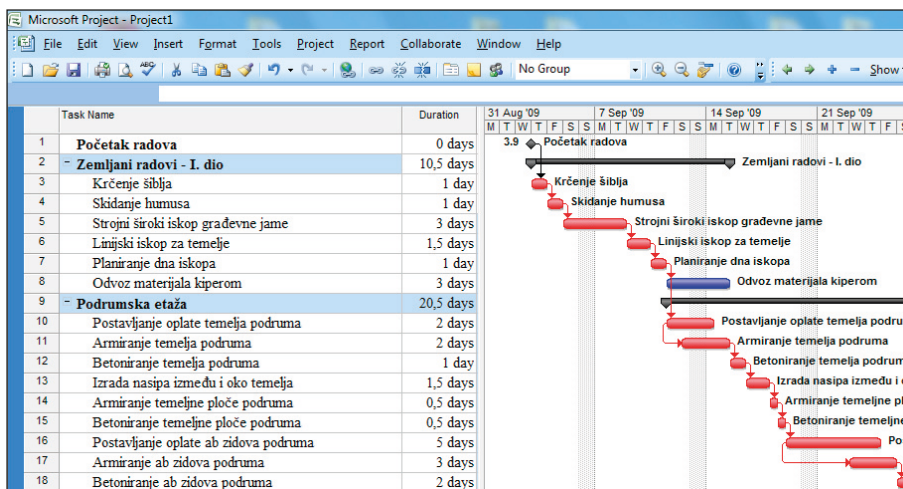
Za izradu vremenskih planova poželjno je koristiti jedan od dostupnih softverskih alata za tu namjenu, od kojih ćemo ovdje opisati MS Project.

Microsoft Project je program za upravljanje projektima osmišljen za planiranje vremena, troškova i resursa u projektu te praćenje napretka plana u tijeku izvedbe projekta.

Pri izradi gantograma izvedbe građevinskog objekta pomoću programa MS Project prvi je korak unos svih aktivnosti prema odabranoj razini detaljnosti. Prema odabranoj tehnologiji i resursima, unaprijed računamo ili procjenjujemo trajanja, nakon čega je potrebno dobivena trajanja i resurse pridružiti svakoj pojedinoj aktivnosti. U nastavku (Slika 6) povezujemo međusobno ovisne aktivnosti odgovarajućim vezama koje program zatim prikazuje u obliku gantograma s vezama („poboljšani“ gantogram).

Prednosti pri izradi vremenskog plana koje donosi korištenje MS Project-a odnose se na pojednostavljen i ubrzan rad. Pravilno dizajnirani osnovni plan u obliku gantograma s aktivnostima koje su ispravno logički povezane i kojima su pridružena trajanja i resursi omogućuje analizu i praćenje projekta iz više različitih aspekata - automatski se kreira mrežni plan, kalendar projekta, kritični put i histogrami za pojedine resurse. Nakon izrade inicijalnog plana („baseline“), na jednostavan način se može izraditi više različitih varijanti izvedbe projekta i izvršiti njihova usporedba (varijantna rješenja). Planovi izrađeni u MS Project-u vrlo su pregledni, a izgled plana i prikazane informacije prilagodljive su zahtjevima korisnika.

Glavni nedostatak korištenja MS Project-a u izradi gantograma predstavlja njegova nepovezanost s prije opisanim elementima tehničke dokumentacije. Preuzimanje podataka iz, primjerice, troškovnika izrađenog u MS Excel-u u MS Project moguće je ostvariti na način da se kopira tekst opisa stavaka, ali je sve ostale podatke (trajanja aktivnosti, resurse) potrebno posebno obračunati. Iako nije specijaliziran isključivo za graditeljstvo, MS Project predstavlja vrlo koristan softverski alat za potrebe planiranja građevinskih projekata.



Slika 6. Primjer izrade gantograma pomoću MS Project aplikacije

3.2. Korištenje specijaliziranih softvera pri planiranju i praćenju projekta

Specijalizirani softveri osmišljeni su kao projektno organizirane računalne aplikacije koje podržavaju planiranje i praćenje izvođenja građevinskih projekata. Uspješno se primjenjuju i za izradu dijelova ili cijelog POG-a. Dosadašnji odvojeni dijelovi POG-a sada se nalaze u integriranom sustavu, čime se riješio veliki nedostatak uobičajenog načina izrade projekta. Troškovnici, građevinska knjiga, situacije i konačne realizacije projekta povezane su u jednom umreženom sustavu. Svaka izmjena i dopuna jednog dijela projektne dokumentacije direktno utječe na ostale dijelove, što omogućuje transparentnost, pravovremeno donošenje odluka i adekvatnu kontrolu tijekom čitavog projekta. Mogućnost pristupa u odgovarajućem obimu mogu imati svi korisnici i sudionici u projektu, čime se umnogome olakšava razmjena informacija. U nastavku će biti prikazana praktična primjena softvera te će se navesti neke od njegovih prednosti i nedostataka.

Sukladno prednostima koje nudi, softver postaje kompliciraniji od uobičajenih načina vođenja projektne dokumentacije. Zasnovan je na Microsoft tehnologijama i za uspješno savladavanje programa korisniku je potrebna određena razina znanja osnovnih programskih paketa.

3.2.1. Troškovnik

Prikaz troškovnika u softveru GALA construction software pregledan je i prilagođen korisniku. Podijeljen je prema grupama radova, kao što je prikazano na Slici 7, što olakšava obradu podataka unutar svake grupe radova, odnosno svake stavke.

Vrste i stavke osvijetljenog troškovnika							
Vrsta radova	S	Oznaka	Naziv stavke troškovnika	JmJ	Količina	Jed. cijer	Ukupno
I. PRETHODNI RADOVI	<input type="checkbox"/>	1.	Nabava, izrada, postavljanje i skidanje dvostranog oplatnog sklopa		1,00		
II. ZEMLJANI RADOVI	<input type="checkbox"/>	a)	— pozicija ab trakastih temelja podrumске etaže	m2	56,70	126,02	7.145,33
III. TESARSKI RADOVI	<input type="checkbox"/>	b)	— pozicija ab trakastih temelja prizemne etaže	m2	82,45	126,02	10.390,35
IV. ARMIRACKI RADOVI	<input type="checkbox"/>	c)	— pozicija ab nadtemeljnih zidova prizemne etaže	m2	104,05	126,02	13.112,38
V. BETONSKI RADOVI	<input checked="" type="checkbox"/>	d)	— pozicije betonskih vanjskih stubišta prizemne etaže	m2	2,75	304,17	836,47
VI. ZIDARSKI RADOVI	<input type="checkbox"/>	2.	Nabava, izrada, postavljanje i skidanje dvostranog oplatnog sklopa	m2	179,25	126,02	22.589,09
	<input type="checkbox"/>	3.	Nabava, izrada, postavljanje i skidanje oplatnog sklopa od krojne c		1,00		
	<input type="checkbox"/>	a)	— pozicija horizontalnih serklaža podrumске etaže	m2	21,90		
	<input type="checkbox"/>	b)	— pozicija horizontalnih serklaža prizemne etaže	m2	18,90		
	<input type="checkbox"/>	Ukupno :		m2	40,80	40,27	1.643,02
	<input type="checkbox"/>	4.	Nabava, izrada, postavljanje i skidanje trostranog oplatnog sklopa o		1,00		
	<input type="checkbox"/>	a)	— pozicije ab nadvoja prizemne etaže	m2	5,90		
	<input type="checkbox"/>	b)	— pozicije ab nadvoja etaže kata	m2	2,90		
	<input type="checkbox"/>	Ukupno :		m2	8,80	257,47	2.265,74
	<input type="checkbox"/>	5.	Nabava, izrada, postavljanje i skidanje oplatnog sklopa od krojne c		1,00		
	<input type="checkbox"/>	a)	— pozicija ab krovnih vijenaca prizemne etaže	m2	44,20		
	<input type="checkbox"/>	b)	— pozicija ab krovnih vijenaca etaže kata	m2	30,70		
	<input type="checkbox"/>	Ukupno :		m2	74,90	132,40	9.916,76
	<input type="checkbox"/>	6.	Nabava, izrada, postavljanje i skidanje složenog oplatnog sklopa od m2		22,20	575,24	12.770,33
	<input type="checkbox"/>	7.	Nabava, izrada, postavljanje sa podupiranjem do visine 3,0 m i skid		1,00		
	<input type="checkbox"/>	a)	— pozicija ab horizontalne ploce prizemne etaže iznad podruma	m2	44,60		
	<input type="checkbox"/>	b)	— pozicija ab horizontalne ploce etaže kata	m2	62,70		
	<input type="checkbox"/>	Ukupno :		m2	107,30	126,08	13.528,38
	<input type="checkbox"/>	8.	Nabava, izrada, postavljanje sa podupiranjem do visine više od 3,0 i m2		103,65	173,42	17.974,98
	<input type="checkbox"/>	9.	Nabava, izrada, postavljanje i skidanje trostranog oplatnog sklopa o	m2	9,00	257,47	2.317,23
	<input type="checkbox"/>	10.	Nabava, izrada, postavljanje i skidanje četverostranog oplatnog sklo		1,00		
	<input type="checkbox"/>	a)	— pozicije ab stupova prizemne etaže	m2	14,00		
	<input type="checkbox"/>	b)	— pozicije ab vertikalnih serklaža prizemne etaže	m2	29,20		

Slika 7. Prikaz troškovnika

Za razliku od uobičajene verzije troškovnika u MS Excel-u, sve informacije vezane za jednu vrstu radova dostupne su na jednom mjestu. Troškovničke stavke mogu se, kao i u MS Excel-u, jednostavno dodati, izmijeniti ili ukloniti iz projekta. Ukoliko okolnosti izrade projekta to zahtijevaju, već izrađeni troškovnik se može unijeti i iz MS Excel-a uz određene preinake te ga je kasnije moguće opet obrađivati.

3.2.2. Dokaznica mjera

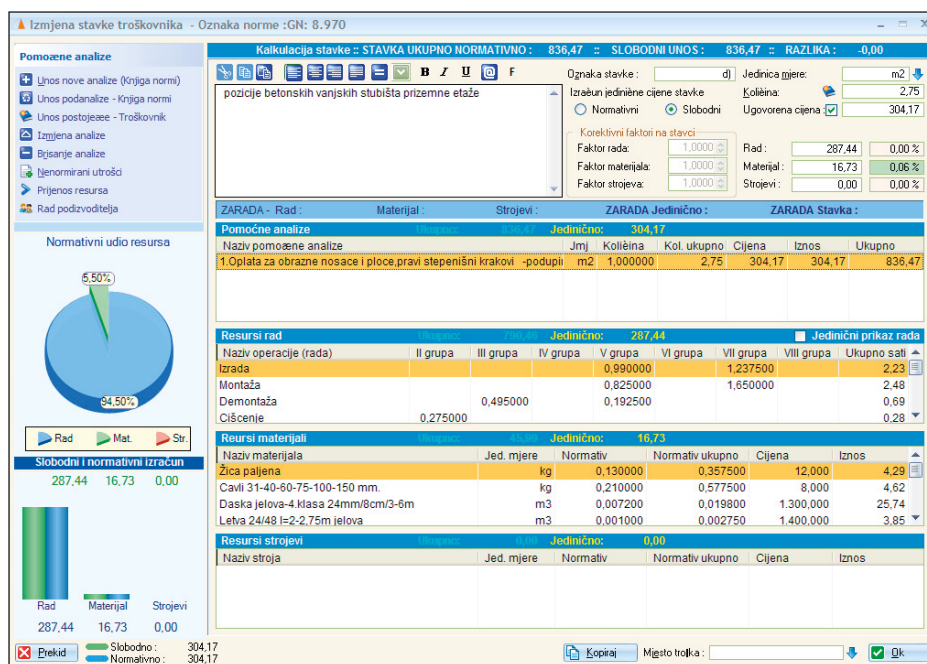
Izračun dokaznica mjera može se izvesti na više načina. Jedan od načina je jednostavan ručni unos logičkih izraza, što ne predstavlja niti prednost niti nedostatak u odnosu na uobičajeni način. Iznimna prednost može se ostvariti uz detaljni i građevinski projektirani 3D model budućeg objekta. Model se može unijeti u softver koji u tom slučaju pokazuje svoju praktičnost i omogućava korisniku automatski izračun dokaznice mjera direktno iz 3D modela.

Navedeni način 3D projektiranja modela budućeg objekta od korisnika traži veći utrošak vremena da bi model bio u skladu sa zahtjevima integriranog softvera. Za potrebe izrade dokaznice (kako bi izračun bio što precizniji), model je potrebno podijeliti u građevinske elemente (npr. posebno bi trebalo označiti vanjske zidove, posebno pregradne, posebno vertikalne od horizontalnih serklaža itd.) te ih softver na taj način može prikazati u zasebnim troškovničkim stavkama. Navedeno zasigurno predstavlja nedostatak u fazi projektiranja, no pri upravljanju projektima putem integriranih softvera u konačnici donosi znatne uštede u vremenu.

3.2.3. Analize cijena

Velika prednost integriranih softvera jesu opsežne baze normativa materijala, strojeva i radnika. Baza u GALA construction software-u sadrži više od 9.000 grupa radova i oko 20.000 vrsta materijala koji se mogu mijenjati, nadopunjavati i brisati te su usklađeni s hrvatskim građevinskim tržištem i ISO standardima, a ima i mogućnost izrade kalkulacija jediničnih cijena [7]. Takav unos analize jedinične cijene postaje jednostavan u vidu izbora prikladne kalkulacije iz baze već izračunatih cijena radova. Specijalizirani softver pritom razlaže ukupnu cijenu troškovničke stavke na cijenu materijala, cijenu rada i cijenu strojeva, kao i na planirani i utrošeni iznos sredstava za odabranu troškovničku stavku, što se vidi na Slici 8.

Korisniku je ponuđena i mogućnost samostalnog unosa kalkulacije cijena koje potom može spremi u bazu normativa i koristiti u sljedećim projektima čime se olakšava i ubrzava izrada daljnjih ponuda.



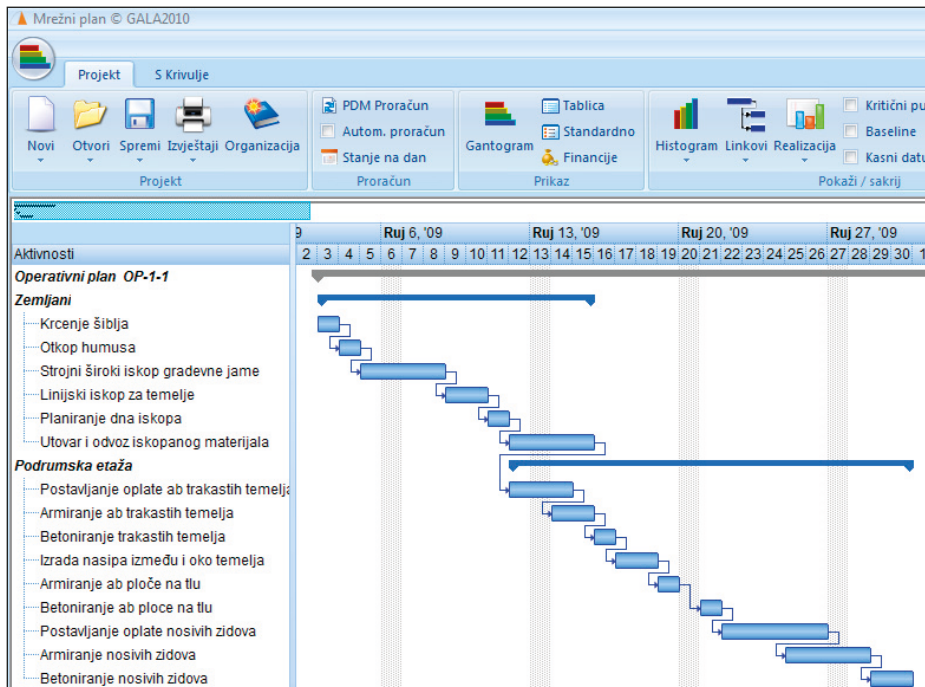
Slika 8. Analiza jedinične cijene

3.2.4. Vremenski plan

Vremenski plan može se kreirati po troškovničkim stavkama, odnosno po vrstama radova gdje softver automatski dodjeljuje stavkama aktivnosti. Strukturu plana moguće je odrediti i prema vlastitom nahodađu. Aktivnosti se tada iz troškovnika razvrstavaju u vremenski plan i dalje obrađuju na uobičajeni način.

Na Slici 9 prikazan je dio dinamičkog plana u početnoj fazi planiranja izrađen na bazi stavki iz spomenutog primjera, gdje se vidi dio već povezanih aktivnosti i dio aktivnosti postavljenih u početnu poziciju. Softver na temelju odabranog normativa, kalendara i količine aktivnosti predlaže trajanje svake aktivnosti te izračunava kritični put plana. Radne grupe i resursi su također automatski određeni svojim normativima, pa se iz vremenskog plana jednostavnim putem mogu iščitati histogrami i S-krivulje (na temelju kojih se dobiva uvid u količine ugrađenog materijala i materijala potrebnog za ugradnju kao i stvarno te projektirano financijsko stanje projekta) potrebni za optimalizaciju resursa, troškova i vremena cijelog projekta.

Najveća prednost izrade vremenskog plana projekta u navedenom softveru je unos aktivnosti direktno iz troškovnika, čime se bitno umanjuje vrijeme njegove izrade.



Slika 9. Dinamički plan – gantogram

4. Usporedba primjene korištenih softvera u građevinskim projektima

U Tablicama 1 i 2 dana je usporedba primjene uobičajenog pristupa te specijaliziranog softvera u izradi i planiranju projekta u graditeljstvu. Kod usporedbe primjene uobičajenih softvera razmatrani su MS Word, MS Excel te MS Project, dok je kao primjer specijaliziranog softvera promatran GALA construction software, kao što je objašnjeno u dijelu „Definiranje problema“.

Tablica 1. Karakteristike uobičajenih softvera prema predloženim kriterijima

Kriteriji / Softveri	Uobičajeni način		
	MS Word	MS Excel	MS Project
Jednostavnost korištenja	jednostavna upotreba	jednostavna upotreba	srednje zahtjevna upotreba, zahtijeva kraću obuku
Vrijeme za obuku	uči se tijekom osnovnoškolskog obrazovanja te je dovoljan osnovni tečaj	za osnovno korištenje dovoljan je napredni tečaj	za osnovno korištenje dovoljan je napredni tečaj
Vrijeme izrade troškovnika, dokaznice i analize cijena	v1: izrada troškovnika i dokaznice duga v2: vrijeme izrade kraće	v1: vrijeme izrade dugo v2: vrijeme izrade znatno se skraćuje	-
Vrijeme izrade vremenskog plana	-	-	vrijeme izrade dugo zbog ručnog unosa podataka
Izračun količina	ručno	moгуće programirati	-
Izračun trajanja	ručno	moгуće programirati	-
Izračun cijena	ručno	moгуće programirati	-
Veza između pojedinih dijelova projekta	veza ne postoji		
Kolaboracija	informacije i podaci se prenose posredno sudionicima projekta raznim komunikacijskim kanalima		
Postojanost podataka	podaci nisu postojani, potrebno je pohranjivati podatke (<i>back-up</i>) zbog mogućih kvarova računala te paziti na ažuriranje podataka i datoteka		
Praćenje izvedbe projekata	-	-	praćenje zadovoljavajuće, obuhvaća gotovo sve aspekte kontrole izvedbe projekata

Navedeni softveri uspoređeni su prema kriterijima jednostavnosti korištenja, potrebnog vremena za obuku, potrebnog vremena za izradu troškovnika, dokaznice i analize jediničnih cijena. Prikazane su dvije varijante unosa projekta od kojih prva varijanta (Tablica 1 i 2 oznaka v1) označava prvi unos projektnih podataka, a druga varijanta (Tablica 1 i 2 oznaka v2) predstavlja daljnje unose. Usporedba je izvršena po pitanju potrebnog vremena za izradu vremenskog plana te izračuna potrebnih količina, trajanja i cijena. Naredni kriteriji usporedbe su kolaboracija i veze između pojedinih dijelova projekata te praćenje izvedbe projekta.

U slučaju korištenja specijaliziranog softvera (Tablica 2) planiranje i praćenje projekta izvodi se unutar integriranog sustava - centralne baze podataka čiji su podaci dostupni svim sudionicima projekta. Takav način rada značajno utječe na brzinu protoka informacija i dokumenata te omogućava istovremeni rad većeg broja sudionika projekta i postojanje jedne („zadnje“) verzije projekta.

Tablica 2. Karakteristike specijaliziranog softvera prema predloženim kriterijima

Kriteriji / Softver	GALA construction software
Jednostavnost korištenja	zahtjevna upotreba, zahtjeva dodatnu edukaciju
Vrijeme za obuku	uz osnovno poznavanje MS Office-a, MS Project-a i drugih CAD alata potrebna je dodatna edukacija
Vrijeme izrade troškovnika, dokaznice i analize cijena	v1: vrijeme izrade dugo v2: vrijeme izrade znatno se skraćuje
Vrijeme izrade vremenskog plana	znatno kraće nego u MS Project-u zbog povezanosti podataka
Izračun količina	unaprijed programirano
Izračun trajanja	unaprijed programirano
Izračun cijena	unaprijed programirano
Veza između pojedinih dijelova projekta	svi dijelovi projekta povezani su u cjelinu
Kolaboracija	sve informacije i podaci pohranjeni su na serveru i dostupni svima u realnom vremenu
Postojanost podataka	svi podaci se automatski ažuriraju i spremaju direktno na server čime je osigurana njihova zaštita
Praćenje izvedbe projekata	praćenje dinamički obuhvaća sve aspekte kontrole projekata

Ako se zbroje svi ranije elaborirani elementi usporedbe, kao osnovne prednosti korištenja konvencionalnih alata u vidu podrške u upravljanju projektima treba istaknuti njihovu raširenost i obučenosť korisnika za rad, dok je

osnovna prednost integriranih softvera mogućnost cjelovitog upravljanja u više faza životnog ciklusa projekta. Nabavka softvera predstavlja dodatni izdatak za tvrtku, što se može smatrati nedostatkom u odnosu na konvencionalni način. Nedostatkom se također može smatrati i potreba dodatne edukacije kadra za rad s integriranim softverom.

5. Zaključak

Upravljanje projektima je u svjetskoj stručnoj literaturi nastaloj u prošlom stoljeću nazvano „najvažnijim poslom 21. stoljeća“ [4]. Budući da graditeljski projekti obiluju velikim brojem radnih zadataka i troškova, voditelji projekata imaju zahtjevne poslove vođenja i praćenja projektnih procesa, kako na gradilištu, tako i u uredu. Razvojem ICT-a u upravljanju građevinskim projektima pojavili su se različiti specijalizirani softveri od kojih je za potrebe ove usporedbe uzet GALA construction software kao predstavnik integriranog programskog paketa.

Usporedbom po pojedinim, bitnim elementima upravljanja projektima primjenom konvencionalnih i integriranog softvera ukazuje se na prednosti i nedostatke svakog od njih. Kao osnovne prednosti korištenja konvencionalnih alata u vidu podrške u upravljanju projektima treba istaknuti njihovu raširenost i obučenost korisnika za rad, no ne treba zaboraviti da je riječ samo o parcijalnoj podršci po pojedinim elementima upravljanja, a ne i o cjelovitom upravljanju projektima.

Za razliku od konvencionalnih, specijalizirani softveri imaju niz prednosti. Postojanje svih informacija i dokumentacije vezane uz projekt na jednome mjestu, njihova sigurnost ali i postojanje samo jedne („zadnje“) verzije dokumenata, dinamičko praćenje izmjena i promjena te kanali kolaboracije predstavljaju bitne prednosti specijaliziranih softvera. Kao glavnu prednost treba naglasiti mogućnost cjelovitog praćenja i upravljanja projektom u cijelom životnom ciklusu projekta. Nabavka ovih softvera predstavlja dodatni izdatak za tvrtku, što se može smatrati nedostatkom u odnosu na konvencionalni način. Nedostatkom se može smatrati i potreba dodatne edukacije kadra.

U integriranom su softveru sve informacije, projektna dokumentacija i kolaboracija kontinuirano dostupne svim korisnicima i sudionicima projekta. Na takav način transparentno su izložene sve informacije koje su voditelju projekta neophodne za pravovremeno i adekvatno donošenje odluka u cilju ostvarenja vremenskih i troškovnih zahtjeva građevinskog projekta. Uz stjecanje novih vještina i kompetencija, integrirani softveri omogućavaju voditelju projekta da se projektni ciljevi ostvare sigurno, uz efikasan utrošak

svih resursa, unutar zadanih rokova i proračuna, prema zadanim tehničkim uvjetima i na zadovoljstvo svih sudionika građenja.

6. Literatura

- [1] D. Car-Pušić, I. Marović, I. Gudac. Važnost projekta organizacije građenja u pripremi izvođenja građevinskih radova. *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, XVIII: 225-243, 2010.
- [2] http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/kvalifikacijski_clanak.pdf; 2011.
- [3] H. Kerzner. *Project Management*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- [4] M. Radujković. Voditelj projekta. *Građevinar*, 52: 143-151, 2000.
- [5] M. Vukomanović, Ž. Papst, Z. Sertić. GALA 2008 – Construction project management software. U: M. Radujković, V. Mlinarić, J. Izetbegović, A. Cerić, ur., *Book of abstracts - 8th International Conference OTMC*, 58-58. Hrvatska udruga za organizaciju građenja, Zagreb, 2008.
- [6] K. Čuljak. *Stručna praksa: Stambena zgrada-obiteljska kuća*. Seminarski rad kolegija Stručna praksa. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Rijeka, 2009.
- [7] <http://gala-construction-software.com>; 2011.

VARIJANTNA RJEŠENJA CESTOVNOG ČVORIŠTA “MLAKA” U RIJECI

ALTERNATIVE SOLUTIONS OF ROAD JUNCTION “MLAKA” IN RIJEKA

Sandra Barić*, Lorella Mekić**, Sergije Babić*

Sažetak. *Prometne mogućnosti cestovne mreže u centru grada Rijeke ne zadovoljavaju prometne potrebe. Prostorno planskim dokumentima načelno je definiran novi cestovni koridor kojim se distribuira promet u zoni šireg gradskog centra. Zbog postojeće izgrađenosti, trasa novog koridora planirana je podzemno pa se naziva i “tunelska obilaznica”. Čvorište Mlaka predviđeno je kao krajnja zapadna točka “tunelske obilaznice” s namjenom prometnog povezivanja postojeće i planirane cestovne mreže uz značajno usložavanje prometnih tokova. U radu su iznesene polazne postavke karakteristične za planiranu lokaciju čvorišta. Varijantna rješenja se temelje na postavkama Generalnog urbanističkog plana (GUP) [1] te respektiraju prostorno stanje područja Mlaka i potrebe očuvanja pojedinih elemenata kao što su zelene površine i stambene zgrade. Za varijanta rješenja proveden je proračun propusne moći. Prema različitim kriterijima provedena je usporedba varijantnih rješenja uz komentar različitih uočenih nedostataka. Proizašao je niz pitanja vezanih za samo čvorište i stvarnu potrebu za čvorištem na predviđenoj lokaciji. Rad predstavlja usporedbu mogućih rješenja za čvorište Mlaka, iako će realizacija čvorišta na navedenoj lokaciji ovisiti o planiranim potrebama i mogućnostima na širem području.*

Ključne riječi: *tunelska obilaznica, cestovno čvorište, propusna moć*

Abstract. *Transport capabilities of the existing road network do not meet the traffic needs in downtown Rijeka. A new road corridor, distributing traffic in the zone of larger urban centers, is generally defined by spatial planning documents.*

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: sandra.baric@net.hr, sergije.babic@gradri.hr

** Grad Rijeka, Odjel gradske uprave za razvoj, urbanizam, ekologiju i gospodarenje zemljištem, Titov trg 3, Rijeka
E-mail: lorella.mekic@rijeka.hr

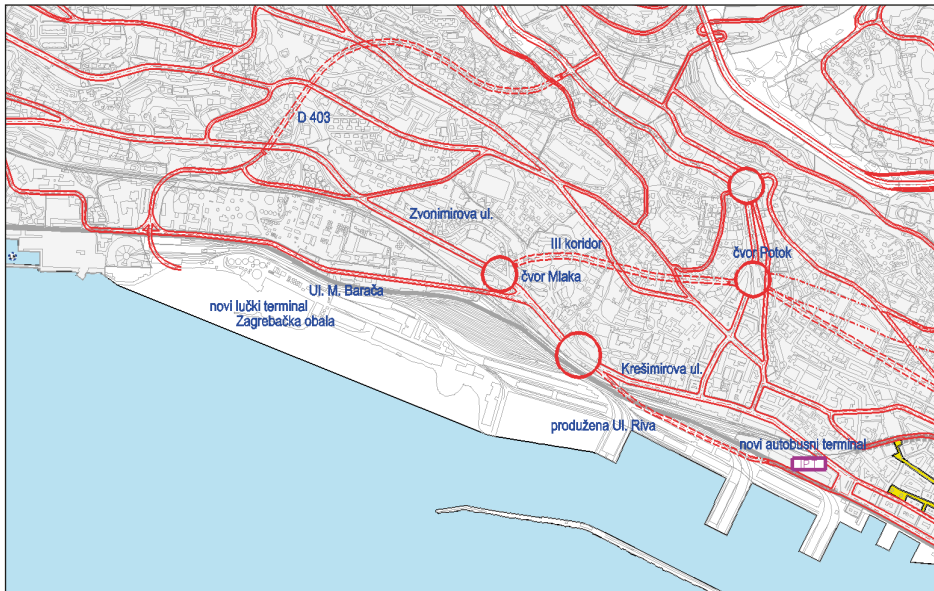
Due to the existing construction, Mlaka is to be the farthest west point of “tunnel bypass” with purpose of connecting the existing and planned traffic. This will lead to significant traffic load. The paper presents the initial settings specific to the planned location of the road junction. Alternative solutions are based on the Master Plan assumptions respecting urban areas of Mlaka in order to preserve certain elements such as green areas and residential buildings. The capacity calculation has also been made for alternative solutions. Alternative solutions have been conducted according to various criteria with the feedback of various perceived deficiencies. The result is a number of issues related to the road junction and the real need for constructing a junction on this location. The paper presents alternative solutions of road junction Mlaka although the construction of the aforementioned on the specified location will depend on planned needs and requirements of the wider scope.

Key words: tunnel bypass, road junction, traffic capacity

1. Uvod

1.1. Tunelska obilaznica centra grada Rijeke - “Treći koridor”

„Treći koridor” je prometnica koja predstavlja dopunu cestovne mreže centra grada Rijeke (Slika 1), prvenstveno namijenjena preuzimanju onih prometnih tokova koji se sa postojeće obilaznice ili viših kota kreću prema centru grada i zatim tranzitiraju između pojedinih dijelova gradskog centra. Naziv *treći prometni koridor* proizašao je iz situacije da ova prometnica uzdužno obilazi centar grada i ujedno predstavlja novi koridor u odnosu na dva postojeća gradska koridora: *prvi longitudinalni prometni koridor* kojeg čini „najjužniji“ potez gradskih ulica - Krešimirova ulica, Ulica Riva, Ulica Ivana Zajca i *drugi longitudinalni prometni koridor* kojeg predstavlja potez ulica koje prolaze višim kotama unutar gradskog centra: Ulica Fiorello La Guardia, Ulica Pomerio, Ulica Žrtava fašizma. Obzirom na svoje „morfološko“ obilježje – oko dvije trećine (cca 3200 metara) ukupne duljine prometnice se nalazi u tunelu - ona se naziva i „*tunelskom obilaznicom centra grada*“. Ovaj se planirani prometni koridor sastoji od tri tunelska odsječka i četiri čvorišta, Mlaka, Potok, Školjić i Brajdica, preko kojih se povezuje na postojeću gradsku cestovnu mrežu. Prema važećem rješenju iz *Generalnog urbanističkog plana Grada Rijeke* (u daljnjem tekstu GUP) [1] planiran je kao četverotračna prometnica i sastoji se od dvije tunelske cijevi. Jedino je čvorište Potok denivelirano, dok su ostala čvorišta riješena u jednoj razini. Na prostoru Školjića predviđen je i alternativni položaj čvora, dok je zapadna dionica ovog koridora – od čvora Potok do čvora Mlaka – „*podložna dodatnom ispitivanju u smislu određivanja mikrolokacije zapadnog čvorišta*” (iz tekstualnog dijela GUP-a, str. 255).



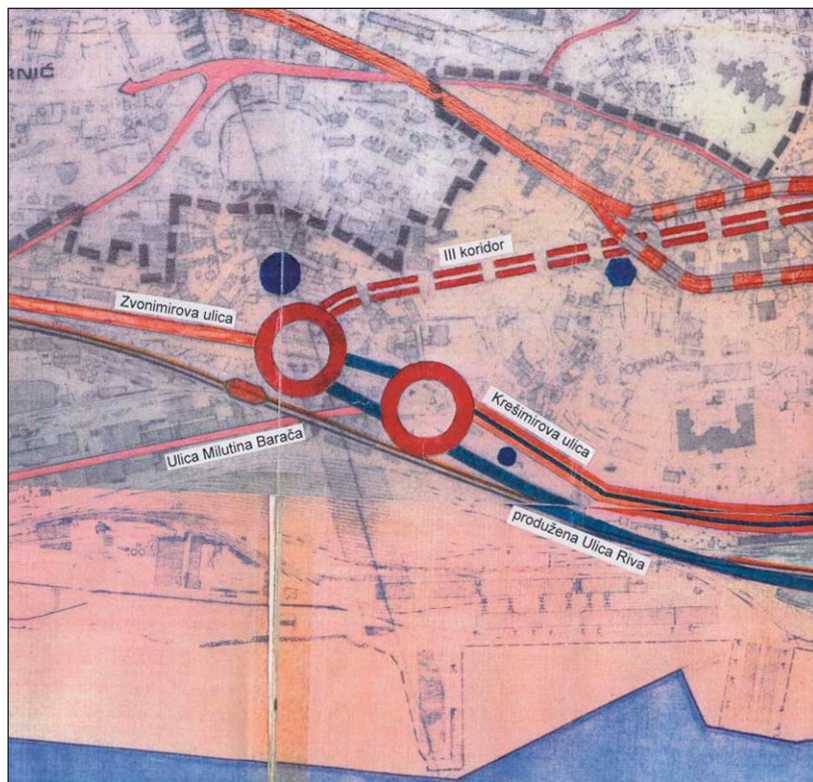
Slika 1. Cestovna mreža šireg područja čvorišta Mlaka - izvadak, [1]

1.2. “Treći koridor” - prethodna rješenja

Tunelsko obilaženje gradskog središta prometnicom prisutno je kao koncept već u *Detaljnem urbanističkom planu centra grada Rijeke* iz 1971. godine [2] u kojem se tunelska veza provlačila od Brajdice prema Bulevardu i Školjiću do Kalafata. Još jedna ideja rasterećenja centra djelomičnim tunelskim vođenjem prometa ispitana je u elaboratu *Idejno prometno i građevinsko rješenje rekonstrukcije i dogradnje drugog longitudinalnog koridora u centru Rijeke – dionica od raskrižja s Ulicom I. Grohovca do raskrižja s Ulicom F. Čandeka* iz 1989. godine [3]. Tunelski odsječak smješta se od parka u Ulici Pomerio do današnjeg raskrižja na Brajdi. Na sličnim osnovama zamišljen je i treći koridor: tunelskog je prolaza radi očuvanja značajki gradskog prostora i ekološke prihvatljivosti. Rješenje je cjelovitije od ranijih - obilazi čitavo gradsko središte te se povezuje s korištenjem garažno-parkirnog sustava i javnog gradskog prijevoza.

Prvi dokument prostornog uređenja koji uvodi treći koridor u važeću prostorno plansku dokumentaciju za područje grada je *Provedbeni urbanistički plan centra grada Rijeke* 1992. godine (u daljnjem tekstu PUP centra grada Rijeke) [4]. Osnovna funkcija ove prometnice je dopuna gradske cestovne mreže koja po svojim kapacitetima ne može prihvatiti povećane količine prometa. Osim toga, plan na čvorišnim točkama predviđa izgradnju garažnih

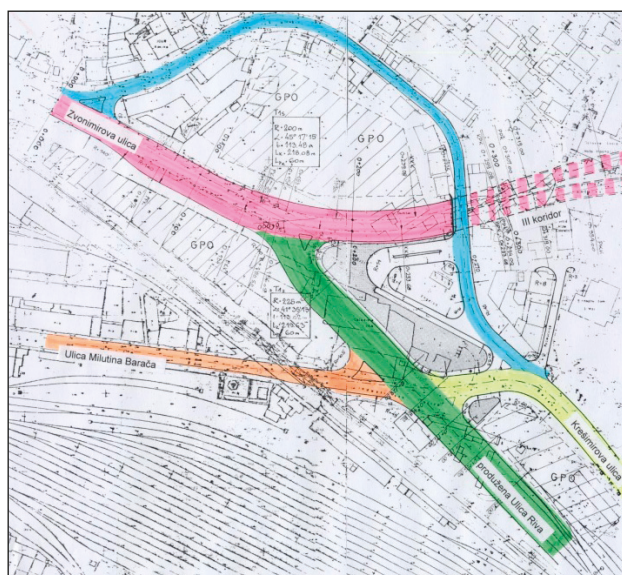
objekata velikog kapaciteta kako bi se na taj način osobna vozila zadržala na rubu gradskog središta. Dopuna ovakvog sustava je javni prijevoz koji opslužuje šire gradsko središte (linija minibusa). Rješenjem iz plana zapadna tunnelska dionica prolazi ispod Zvonimirove ulice podvožnjakom i spaja se s Industrijskom ulicom (danas je to Ulica Milutina Barača), odnosno planiranom prometnicom koja predstavlja produžetak Ulice Riva, dok se Krešimirova ulica spaja istočnije u zasebno raskrižje (Slika 2.).



Slika 2. PUP centra grada Rijeke [4] , izvadak

Na temelju odrednica PUP-a centra grada Rijeke 1994. godine izrađeno je projektno rješenje koridora u elaboratu *Zaobilaznica centra grada Rijeke* [5]. Težina specifične problematike uklapanja nove prometnice u potpuno izgrađeni prostor grada u ovom projektom rješenju dolazi do jakog izražaja. Posebno je to uočljivo na rješenjima čvorišta gdje se trebao postići kompromis između izgrađenosti prostora, prometnih potreba i povezivanja s postojećim prometnicama, funkcioniranja postojećih građevina u novim uvjetima, očuvanja zaštićenih građevina, očuvanja zelenih površina, prihvaćanja planiranih namjena i drugih uvjeta.

Prilikom izrade projektnog rješenja samog čvorišta Mlaka uvjeti su bili nešto jednostavniji u smislu ranije navedenih ograničenja u odnosu na čvorišta Potok ili, na primjer, Školjić na kojem u drugom nivou, iznad glavne prometnice, prolazi željeznička pruga. Složenost rješenja odnosila se primarno na velik broj prometnica koje treba povezati na samom čvorištu ili njegovom kontaktnom prostoru. Kako je vidljivo na situaciji čvorišta Mlaka (Slika 3.), [5] prometno rješenje zauzima relativno veliku površinu. Čvorište zapravo predstavlja svojevrsni prometni „ulaz“ u centar grada sa zapadne strane i sastoji se od nekoliko raskrižja različite važnosti. Glavni smjer predstavlja potez tunelska obilaznica – Zvonimirova ulica pri čemu tunelska obilaznica prolazi ispod Ulice Luki i blagom krivinom „ulazi“ u postojeći koridor Zvonimirove ulice. Na ovaj glavni smjer u trokrako se raskrižje spaja nova planirana prometnica koja predstavlja produžetak Ulice Riva koja s trga Žabica nastavlja južno od postojećih željezničkih skladišta, denivelirano kroz željezničko lučku zonu do Mlake.



Slika 3. Zaobilaznica centra grada Rijeke [5] , izvadak

Krešimirova ulica postaje manje značajni koridor, na istočnom se dijelu priključuje u četverokrako raskrižje s Ulicom Milutina Barača. Prilaz Ulici Luki i postojećoj benzinskoj postaji omogućen je s Krešimirove ulice. U bliskom kontaktnom prostoru, možemo čak reći da se radi o sastavnim dijelovima čvorišta, predviđa se izgradnja nekoliko garažno – parkirnih objekata: u denivelaciji južno od Ulice Luki, u prostoru koji „preostaje“ između nove prometnice, produžene Ulice Riva i Krešimirove ulice te prostoru između Zvonimirove ulice i Ulice Milutina Barača.

GUP uvažava rješenje iz ove dokumentacije, međutim, već je navedeno da ostavlja i mogućnost dodatnog ispitivanja čitave zapadne tunelske dionice i samog čvorišta Mlaka u smislu određivanja mikrolokacije i prometnog rješenja čvorišta. U tom se kontekstu ovaj rad bavi izvršenim dopunskim prometnim i građevinskim ispitivanjem čvorišta Mlaka.

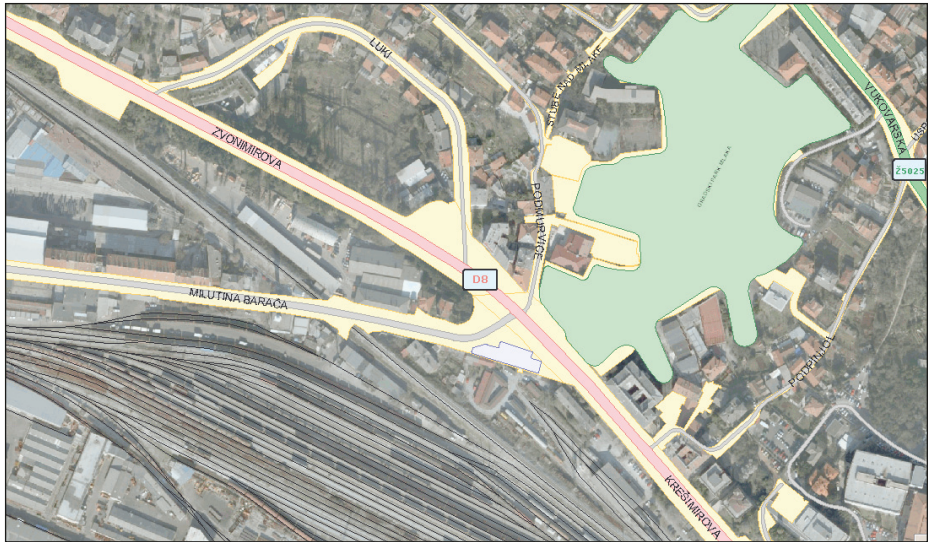
2. Pripremni radovi i podloge za izradu varijantnih rješenja

2.1. Definiranje površine obuhvata u prostoru

Oblik i tip cestovnog čvorišta definiran je prvenstveno prometnim potrebama i brojnošću privoza. U „slobodnim“ okolnostima, odnosno uvjetima neizgrađenih područja, položaj trase ceste podređen je potrebama čvorišta kao relativno krutog oblikovnog objekta. Ograničeni izbor tehničkih elemenata trase u području čvorišta zahtijeva pažljiv izbor lokacije kako bi se objekt povoljno uklopio u uvjete okoliša. Čvorišta su ključne točke razmatranja položaja trase u prostoru, pogotovo u fazama idejnih postavki koridora cestovne mreže. U izgrađenim urbanim sredinama, (postojeća cestovna mreža), oblikovanje čvorišta je složen zadatak koji iziskuje sagledavanje brojnih potreba na predviđenoj lokaciji. Pripremne radnje, osim pribavljanja neophodnih geodetskih podloga, podrazumijevaju sveobuhvatno sagledavanje uvjeta na lokaciji. Osim tehničkih i prometnih elemenata postojeće cestovne mreže, stanje postojeće izgrađenosti na lokaciji obuhvaća i sagledavanje kvalitete okolnih površina zbog planiranog proširenja, tj., preoblikovanja postojećih prometnih površina. Pri tome je potrebno procijeniti težinu, odnosno važnost pojedinih sadržaja kako bi se pri oblikovanju čvorišta izbjegla devastacija kvalitetnih sadržaja. Pored stanja postojeće izgrađenosti potrebno je sagledati i planirane zahvate, odnosno namjene pojedinih površina definiranih prostornoplanskom dokumentacijom različitog nivoa razrade. Kvalitetan prikaz postojećeg i planiranog stanja na lokaciji preduvjet je za polaganje tehničkih elemenata čvorišta. Izbor tehničkih elemenata čvorišta proizlazi prvenstveno iz planiranih uvjeta odvijanja prometa gdje se dominantnim (glavnim) prometnim smjerovima nastoji omogućiti kontinuirano kretanje uz ravnomjerne tehničke uvjete (stalna brzina kretanja), a sporednim smjerovima građevinskim oblikovanjem naglasiti podređenost kretanja. Implementacija čvorišta u urbanoj sredini gotovo redovito podrazumijeva i preoblikovanje okolnog prostora s izmjenama u postojećoj cestovnoj mreži. Pored oblikovanja novih prometnih površina potrebno je i postojeće prometne površine „prilagoditi“ planiranim uvjetima odvijanja prometa kako bi se omogućilo prometno povezivanje najmanje na razini postojećeg stanja.

2.2. Postojeće stanje

Na lokaciji Mlaka (slika 4.) spajaju se Krešimirova i Zvonimirova ulica kao dio prvog longitudinalnog prometnog koridora (D8), Ulica Milutina Barača (Luka Rijeka-Zapad) te stambene Ulice Luki (jednosmjerna) i Podmurvice.



Slika 4. Područje Mlaka u Rijeci (<http://www2.rijeka.hr/ip2/Default.aspx>)

Promet se distribuira preko semaforiziranog četverokrakog raskrižja u blizini kojeg se nalazi javno parkiralište, autobusna stajališta, benzinska postaja te park Mlaka u sjeveroistočnom dijelu područja. Sa zapadne strane postojećeg raskrižja nalaze se skladišni prostori i stambena zgrada. S južne strane nalazi se prostor ranžirnog kolodvora. Depresija na sjeverozapadnom dijelu je slobodna neizgrađena površina.

2.3. Prometno opterećenje

Predviđanje prometnog opterećenja novih cesta u postojećoj gradskoj mreži vrlo je zahtjevan zadatak, pri čemu na očekivano prometno opterećenje mogu utjecati i detalji predloženih oblikovanja čvorišta. Nepravilno oblikovani ili nepregledni privozi navode vozače na korištenje alternativnih pravaca kretanja koji pružaju veću sigurnost uz očekivano dulje vrijeme putovanja. Postojeće prometno opterećenje razmatralo se na širem području koje obuhvaća susjedna raskrižja na Zvonimirovoj, Krešimirovoj i Vukovarskoj ulici, a prema brojanju prometa iz 2007. [6] i 2008. [7] godine. Analiza prometnog opterećenja i distribucija prometa po novim cestovnim pravcima (tunelska obilaznica i Ulica

Riva) izvršena je za potrebe diplomskog rada "Varijantna rješenja nastavka Ulice Riva" [8] i korištena u ovom radu uz procjenu vršnog sata od 8.50 % dnevnog prometa. U tablici 1. prikazana je distribucija prometa po pojedinim privozima prometno priključenim na lokaciju planiranog čvorišta.

Tablica 1. Distribucija prometnog opterećenja (voz/h), P - privoz, O - odvoz [8]

VOZILO	Krešimirova		Zvonimirova		Tunel		Baračeva		Luki	
	P	O	P	O	P	O	P	O	P	O
PA	601	482	3294	3234	1767	1929	1111	1129	94	24
BUS	9	40	49	9	4	0	5	17	0	0
TA	16	16	98	75	41	57	25	32	0	0
TTA	1	1	6	8	3	2	5	4	0	0
MT	14	13	98	85	49	59	29	33	9	5
ukupno	641	552	3544	3412	1864	2046	1176	1215	104	28

2.4. Uvjeti korištenja postojećih i planiranih sadržaja na prostoru čvorišta

Za potrebe izrade rješenja sagledani su uvjeti polaganja trase i razvijanja čvorišta koji respektiraju postojeće sadržaje i uvjete definirane prostorno planskom dokumentacijom. Park Mlaka, prostor ranžirnog kolodvora i stambene zgrade sa sjeverne strane Krešimirove ulice su površine koje se u potpunosti moraju poštivati. Površine benzinske postaje i skladišnih prostora sa stambenom zgradom na zapadnoj strani mogu se po potrebi koristiti za smještaj čvorišta. Izlazni portal tunela predviđa se na sjevernom obodu depresije s kotom izlaska ispod Ulice Luki. Tlocrtni položaj portala tunela moguće je izmjestiti na lokaciju primjerenu varijantnom rješenju čvorišta. Ulice Luki i Podmurvice moraju ostvariti prometnu povezanost na području čvorišta. Krešimirova ulica (Rijeka - centar) mora imati najmanje mogućnost prihvata javnog gradskog prijevoza. Lokacija priključka nastavka Ulice Riva na područje čvorišta također nije još uvijek jednoznačno definirana pa se pri izradi rješenja razmatrala mogućnost priključenja u koridoru Krešimirove, odnosno Baračeve ulice ili kao zaseban koridor preko područja ranžirnog kolodvora (preuzeto iz [8]). Visinski položaj trasa ograničen je kotama postojećih privoza i ulaza stambenih zgrada.

3. Varijantna idejna rješenja čvorišta

3.1. *Općenito o razmatranim varijantama rješenja*

Prikazana varijantna rješenja čvorišta detaljno su opisana u diplomskom radu „Varijantno rješenje čvorišta Mlaka” [9], a nastavno su iznesena osnovna obilježja varijantnih rješenja.

Sagledavajući u poglavlju 2. opisane prostorne mogućnosti lokacije, postojeću izgrađenost i razvijenost prometne mreže te buduće potrebe planiranog čvorišta uočena je kompleksnost izgradnje čvorišta na ovoj lokaciji. Navedeno se razmatralo kroz više varijantnih rješenja za koja su provedene analize prometnog opterećenja i izvršen proračun kapaciteta odnosno očekivani nivo usluge na kraju planskog perioda (15 godina) po realizaciji objekata u cjelini.

Razmatrana su dva osnovna tipa čvorišta:

- I - denivelirano čvorište modificiranog oblika trube,
- II - raskrižje s kružnim tokom prometa u nivou (rotor).

Pri tom su mogućnosti priključka nastavka Ulice Riva:

- A - na Ulicu Milutina Barača,
- B - preko željezničkog kolodvora na lokaciju postojećeg raskrižja,
- C - na Krešimirovu ulicu i nastavno Krešimirovom na čvorište.

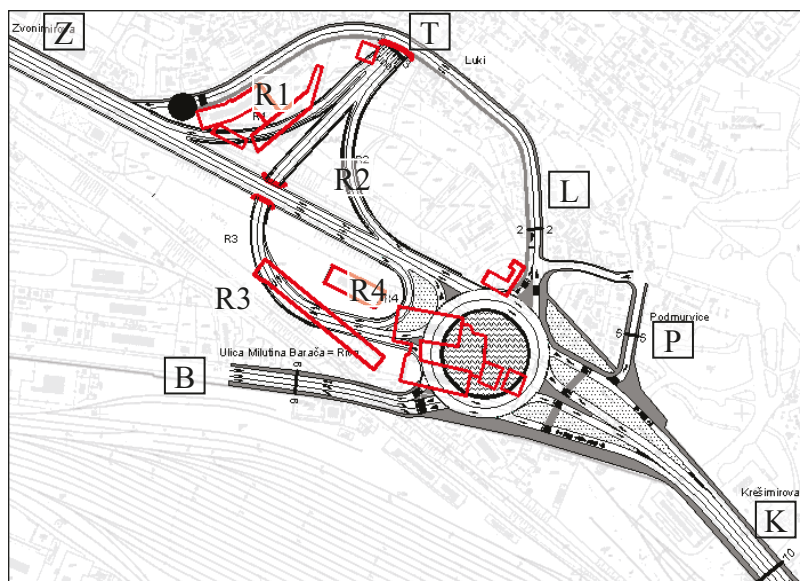
Oznake varijantnih rješenja odgovaraju osnovnom tipu čvorišta (I ili II), varijanti priključenja/povezivanja novih i postojećih cesta (1, 2 ili 3) te mogućnosti priključenja ulice Riva (A, B ili C) na lokaciju Mlaka. Različito obrađeni segmenti cestovne mreže (npr. Ulica Luki) prikazani u pojedinim rješenjima primjenjivi su i u ostalim te posebno naznačeni u daljnjem tekstu. Neki od kriterija razrade varijantnog rješenja bili su rješavanje tranzitnog i gradskog prometa, javni promet, uklapanje u postojeće stanje, lokacija portala tunela, očuvanje zelenih površina. Ovi kriteriji prikazani su tabelarno i korišteni pri valorizaciji pojedinih varijantnih rješenja.

3.2. *Rješenja tip I – denivelirano čvorište tipa “truba”*

Grupa rješenja I temelji se na čvorištu tipa modificirane ‘trube’, odnosno denivelaciji križanja trase tunelske obilaznice i Zvonimirove ulice s izmještanjem raskrižja na prometno povoljniju lokaciju udaljenu od izlaznog portala tunela. Uz niz postojećih privoza pojavljuju se i dva nova (Tunelska obilaznica, Ulica Riva) te se kružno raskrižje (II, slike 5., 6., 7.) na lokaciji današnjeg nametnulo kao razumno rješenje. Osim toga razmatrale su se mogućnosti maksimalnog zadržavanja postojećeg stanja izgrađenosti (I3A,

slika 9.) te uvođenje dva kružna raskrižja (I2A, slika 8.). Formirane su rampe za direktno vođenje prometa tamo gdje zbog postojeće izgrađenosti trake nedostaju ili su nedovoljno duge za ubrzanje/usporenje. Prometni profil Zvonimirove ulice postao je trotračan u području nadvožnjaka. Kružni tok je dvotračan s prometnim trakovima širine 6 m, vanjskog radijusa $R=40$ m kao maksimalnog na raspoloživom prostoru. Radijusi uljeva prometa na kružni tok iznose $R=15$ m, a radijusi izljeva $R=15-18$ m. Visinski je rotor položen u nagibu 3 % kako bi se omogućio kvalitetan priključak svih privoza. Krešimirova ulica se varijantno tretirala kao ulica rezervirana za javni gradski promet, s dvije trake i uz preusmjeravanje ostalog prometa na Ulicu Riva. Za zadržavanje postojećeg režima prometa na Krešimirovoj ulici potrebne su neznatne preinake privoza kružnom raskrižju koje ne utječu bitno na konačno rješenje. U ovim varijantnim rješenjima neophodno je zatvaranje zapadnog privoza Ulice Luki, izmještanje benzinske postaje te izvedba spojne ceste između Ulice Luki i Podmurvice u duljini oko 60 m s preregulacijom prometa.

3.2.1. Varijanta I1A - Ulica Riva priključena preko Baračeve ulice



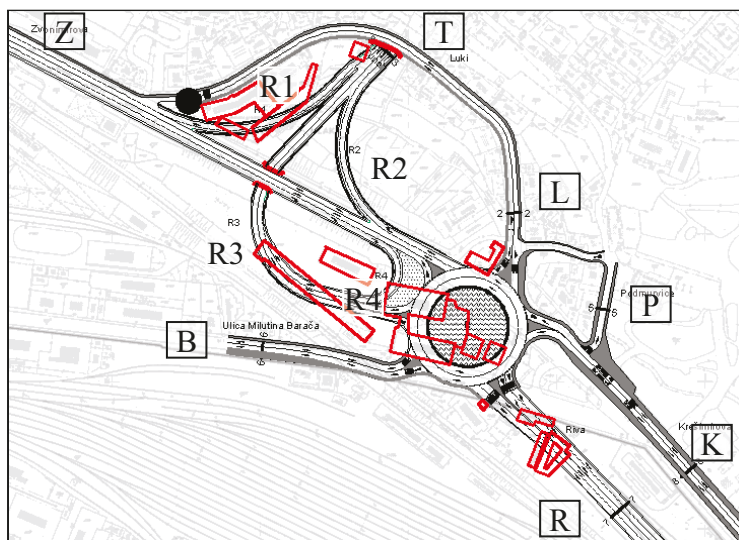
Slika 5. Varijanta I1A s označenim objektima za rušenje [9]

Zbog priključenja Ulice Riva na Baračevu ulicu (B) ista ima trotračni profil s dvije prometne trake u smjeru Mlaka (Slika 5.). Dispozicija privoza na kružnome toku je nepovoljna jer su najopterećeniji smjerovi grupirani na zapadnoj strani kružnoga toka gdje nije moguće ostvariti dvotračnost svih ulaza.

Izdvajanjem čvorišnih rampi R2 i R4 vrši se rasterećenje kružnog toka prometa, što ujedno omogućava jednostrane privoze čvorišne rampe R3 i Zvonimirove ulice (Z) na kružni tok. Na kružni tok priključuje se pet dvosmjernih privoza te jedan jednosmjerni ulaz i izlaz. Povećanje promjera kružnoga toka nije moguće bez značajnijeg zadiranja u okolno područje i dodatnog rušenja objekata, a smještanje kružnog toka zapadnije na povoljniju lokaciju također nije moguće zbog nepovoljnih visinskih odnosa privoza (priključenje Zvonimirove i Ulice Luki (L) te Baračeve ulice (zbog željezničkog nadvožnjaka)). Pješački promet preusmjeren je na Ulicu Luki.

3.2.2. Varijanta I1B - Ulica Riva priključena preko željezničkog kolodvora

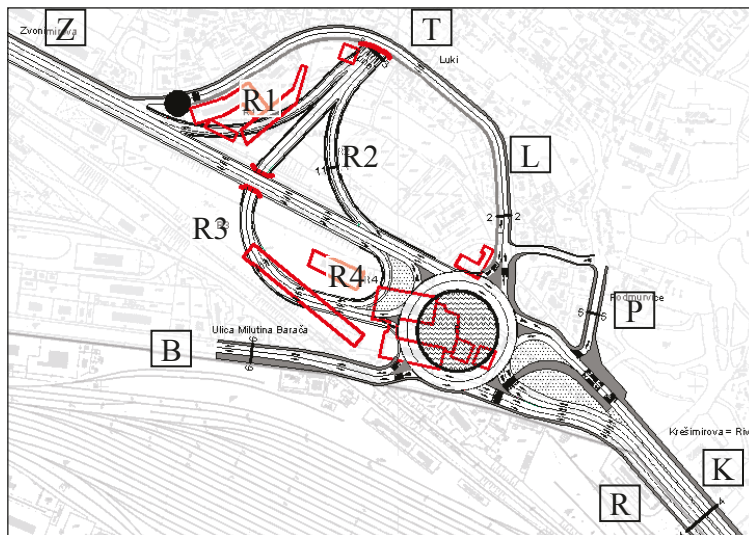
Za potrebe priključenja Ulice Riva kao posebnog četverotračnog privoza kružnom raskrižju prostor u jugoistočnom kvadrantu stvoren je pregrupiranjem privoza Krešimirove ulice (K) koja prihvaća javni gradski prijevoz, dok se ostali promet preusmjerava na Ulicu Riva (R). Kružno raskrižje ima iste osnovne elemente kao i u varijanti I1A, ali sa šest dvosmjernih privoza (Slika 6.). Zbog dvotračnog privoza Baračeve ulice u zapadnom dijelu rotora stvoreni su povoljniji uvjeti ulaska/izlaska vozila iz kružnog raskrižja. Pješački promet preusmjeren je na Ulicu Luki.



Slika 6. Varijanta I1B s označenim objektima za rušenje [9]

3.2.3. Varijanta I1C - Ulica Riva priključena preko Krešimirove ulice

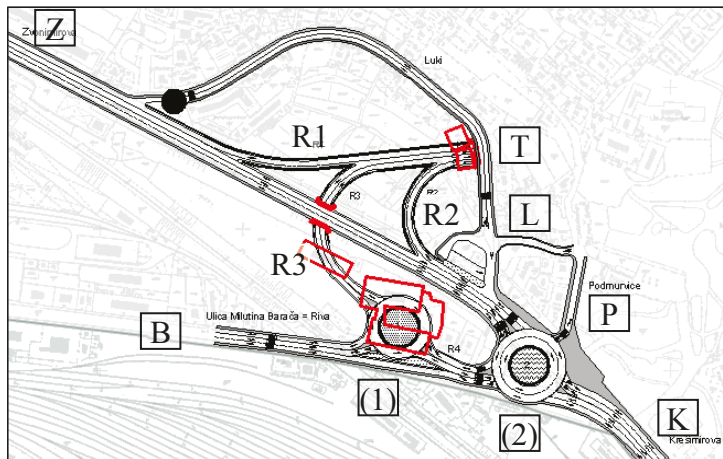
Nastavak Ulice Riva koristi južni dio postojećeg koridora Krešimirove ulice u kojem su dvotračni (Krešimirova ulica) i četverotračni (Ulica Riva) kolnik razdvojeni zelenim pojasom (Slika 7.). Krešimirova ulica namijenjena je javnom prijevozu i lokalnoj vožnji. Priključenje Ulice Riva izvedeno je u području postojeće javne površine „S“ krivinom radijusa $R=80$ m. Kružno raskrižje je gotovo identično onom prikazanom u varijanti I1B.



Slika 7. Varijanta I1C s označenim objektima za rušenje [9]

3.2.4. Varijanta I2A – denivelirano čvorište - „truba“ s dva kružna raskrižja

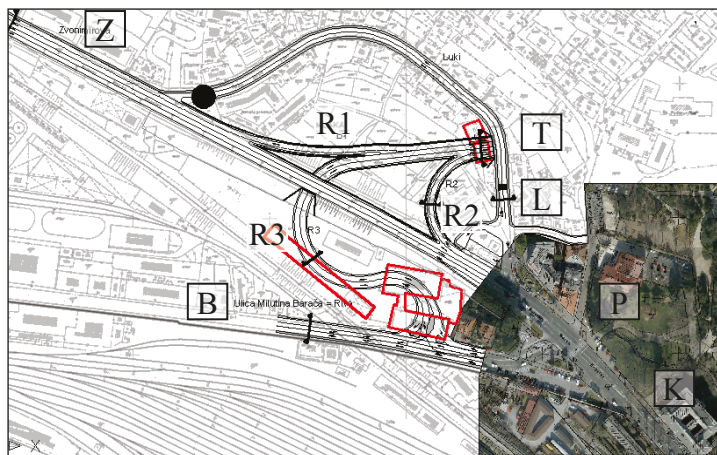
Dva kružna raskrižja (Slika 8.), zapadno jednostručno (1) vanjskog radijusa $R=22$ m sa širinom voznog traka od 7 m i istočno dvotračno (2) radijusa $R=26$ m sa širinom voznih traka od 5.5 i 6.0 m, imaju smanjene mogućnosti prihvata prometa na privozima. Rješenje je moguće primijeniti samo ukoliko se Ulica Riva priključi na Baračevu ulicu. Prikazana je i mogućnost lociranja izlaznog portala tunela (T) na krajnjoj istočnoj poziciji, što je primjenjivo u svim varijantnim rješenjima. Vanjske trake tunelskog profila ceste direktno se nastavljaju na rampe R1 i R2. Visinski položaj kružnih raskrižja prilagođen je kotama postojećih kolnika. Na zapadno raskrižje priključuju se tri dvosmjerna privoza, a na istočno tri dvosmjerna i jedan jednosmjerni privoz (Ulica Podmurvice). Ovo rješenje zahtijeva rušenje većeg broja objekata i promjenu režima prometa Ulice Podmurvice (P). Pješacima nije omogućeno kretanje sjevernom stranom Zvonimirove ulice.



Slika 8. Varijanta I2A s označenim objektima za rušenje [9]

3.2.5. Varijanta I3A – čvorište „truba“ s semaforiziranim „T“ raskrižjima

Varijantom I3A (Slika 9.) predviđena je izvedba novog „T“ raskrižja s neophodnom semaforizacijom pri čemu se postojeće raskrižje zadržava sa svim pratećim sadržajima (parkiralište, autobusna stajališta). Kao i u varijanti I2A, rješenje je moguće primijeniti samo u slučaju da se Ulica Riva priključi na Baračevu ulicu. Zvonimirova ulica trasom i visinskim položajem ostaje na postojećoj lokaciji, ima 3 trake u području nadvožnjaka te zasebne trake za rampe R1 i R2. Krešimirova ulica i Ulica Podmuvice također ostaju na postojećoj lokaciji. Pješacima nije omogućeno kretanje sjevernom stranom Zvonimirove ulice.



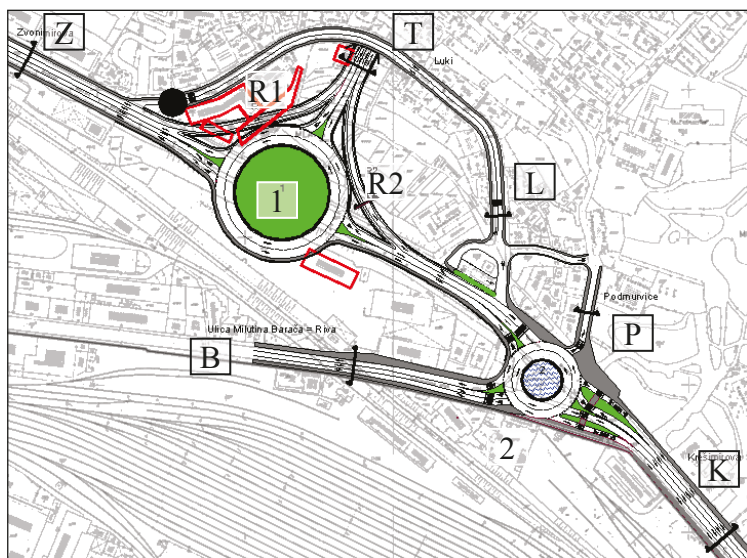
Slika 9. Varijanta I3A s označenim objektima za rušenje [9]

3.3. Rješenja II – raskrižje s kružnim tokom prometa –“rotor”

Ova grupa rješenja nastoji formirati čvorište na dvije dovoljno udaljene lokacije s izravnijim spojem izlaza iz tunela. Rješenja se temelje na dva dvotračna kružna raskrižja, zapadno radijusa $R=45$ m i istočno radijusa $R=26$ m. Kružna raskrižja položena su u nagibu od 2.5 % zbog mogućnosti priključenja privoza. Radijusi uljeva iznose $R=14$ m i $R=15$ m, a radijusi izljeva $R=15$ m. Četverotračnom Krešimirovom ulicom odvija se mješoviti promet s mogućnošću formiranja traka rezerviranih za javni gradski prijevoz. Izlazni portal tunela prikazan je na krajnjoj zapadnoj poziciji iako je moguća i njegova dislokacija. Omogućeno je zadržavanje velikog broja postojećih objekata i sadržaja. Smanjenjem promjera zapadnog kružnog raskrižja i izvedbom jednotračnog kolnika mogu se postići blaži nagibi rampi, veći razmak između kružnih raskrižja, povoljnije visinsko vođenje nivelete Zvonimirove ulice te smanjenje broja objekata predviđenih za rušenje. Spoj Ulice Riva preko prostora HŽ-a na istočno kružno raskrižje zahtijeva povećanje promjera kružnog toka i daljnje rušenje postojećih objekata.

3.3.1. Varijanta IIIA

Ulica Riva priključena je na Baračevu ulicu (Slika 10.) koja dobiva trotračni profil. Rampe R1 i R2 opcionalno prolaze obodno uz kružno raskrižje. Na zapadno kružno raskrižje priključuju se tri dvosmjerna privoza, a na istočno dvosmjerna i jedan jednosmjerni ulaz (Ulica Podmurvice).



Slika 10. Varijanta IIIA s označenim objektima za rušenje [9]

4. Prometni kapaciteti i opterećenost privoza po predloženim rješenjima

4.1. Metode proračuna

Za izračun kapaciteta i opterećenosti pojedinih privoza korištena je austrijska metoda prema Smjernicama za projektiranje i opremanje raskrižja kružnog oblika - rotora [10] i HCM (Highway Capacity Manual) za proračun ostalih elemenata čvorišta. Karakteristike privoza preuzete su iz iznesenih varijantnih rješenja, a uz variranje faktora geometrija ulaza i broja voznih trakova nastojalo se postići povoljnije oblikovanje u cilju ostvarivanja zadovoljavajuće propusne moći čvorišta. Navedeni standardni/uobičajeni proračuni tretiraju pojedinačne elemente čvorišta (propusna moć privoza). Njima se uočavaju pojedini neprimjereni elementi građevinskog oblikovanja (rubni radijusi, širine privoza, broj prometnih traka,.....). Takav uobičajeni postupak dopunjen je ocjenom opterećenosti slobodnog toka prometa. Prometni tokovi u ovako složenim čvorištima opterećeni su brojnim aktivnostima zaustavljanja, uplitanja i isplitanja. Ocjena „težine“ pojedine aktivnosti pri tome je pojednostavljena na način da aktivnost zaustavljanja ima ocjenu 2, a aktivnosti uplitanja i isplitanja ocjenu 1. Količina i vrsta tih aktivnosti na svim prometnim tokovima u području čvorišta prikazuje stanje odvijanja prometa na čvorištu čime daje dodatnu i cjelovitiju ocjenu uspješnosti pojedinog varijantnog rješenja..

Prikazana varijantna rješenja su složena cestovna čvorišta te je za ocjenu povoljnosti rješenja poželjan kompletniji prikaz stanja odvijanja prometa na području cjelovitog čvorišta. Navedene metode ocijenjene su u ovom radu kao dovoljne za usporedbu brojnih varijantnih rješenja i eliminaciju nepovoljnih. Rješenja ocijenjena kao povoljna svakako traže i detaljnije analize u eventualnim nastavnim razradama.

4.2. Rješenje I – denivelirano čvorište tipa “truba”

4.2.1. Rješenje II – denivelirano čvorište tipa “truba” s kružnim raskrižjem

U tablici 2. prikazani su rezultati proračuna opterećenosti privoza za varijantu IIA. Privozi iz Zvonimirove i Ulice Milutina Barača ne zadovoljavaju zbog preopterećenosti količinom prometa u kružnom toku što je posljedica koncentracije prometno najopterećenijih privoza na zapadnoj strani kružnoga raskrižja. Izdvojena rampa za smjer Tunel – Zvonimirova ulica pokazala se opravdanom, dok za smjer Zvonimirova ulica – Tunel nije dovoljna i zahtijeva formiranje dvotračnog ulaza na kružno raskrižje ili dvotračnog profila rampe, što u prikazanim okolnostima nije provedivo.

Tablica 2. Opterećenje i iskorištenost ulaza po privozima (varijanta IIA) [10]

Privoz/ulica	Prometno opterećenje			kapacitet	iskorištenost
	Me -ulaz	Mk - Kružni tok	Ma -Izlaz	L	A
Krešimirova	611	1421	650	511	71.75%
Luki	27	1934	98	416	6.49%
Zvonimirova	1737	75	1886	1376	126.22%
Tunel	186	1768	44	533	34.88%
Baračeva	1272	799	1155	560	136.18%

Kod varijanti IIB i IIC raspodjela prometnog opterećenja je ravnomjernija, ali su opterećenja još uvijek takva da se ni uvođenjem dvotračnih ulaza ne dolazi do zadovoljavajućih rezultata.

4.2.2. Rješenje I2 – denivelirano čvorište tipa "truba" s dva kružna raskrižja

Razdvajanje jednog velikog u dva manja kružna raskrižja povoljno je sa stanovišta korištenja prostora, ali uz usvojena prometna opterećenja i vrijeme čekanja na ulaz dolazi do zagušenja prometa tako da se rješenje pokazalo neprimjerenim zbog nemogućnosti postizanja zadovoljavajućeg razmaka između raskrižja [9].

4.2.3. Rješenje I3 – denivelirano čvorište tipa "truba" s 2 "T" raskrižja

Semaforizacija dva bliska „T“ raskrižja se, očekivano, za usvojeno prometno opterećenje pokazala nezadovoljavajućom. Za proračun ciklusa semafora na oba raskrižja usvojene su tri faze ciklusa. Koeficijent iskorištenja raskrižja je veći od 1 te se c (ciklus) javlja u negativnoj vrijednosti.

4.3. Rješenja II – raskrižje s kružnim tokom prometa -"rotor"

Križanja prometnih smjerova dislocirana su na dvije maksimalno moguće razdvojene lokacije na kojima se primjerenim pokazalo formiranje raskrižja s kružnim tokom prometa. Tablicama 3. i 4. prikazani su rezultati proračuna.

Tablica 3. Opterećenje ulaza po privozima za zapadno kružno raskrižje

Privoz/ulica	Prometno opterećenje			kapacitet	iskorištenost
	Me -ulaz	Mk - Kružni tok	Ma -Izlaz	L	A
Zvonimirova1	2144	85	3507	1359	154.79%
Zvonimirova2	1786	1806	1639	457	358.31%
Tunel	1806	1639	590	546	108.14%

Tablica 4. Opterećenje ulaza po privozima za istočno kružno raskrižje

Privoz/ulica	Prometno opterećenje			kapacitet	iskorištenost
	Me -ulaz	Mk - Kružni tok	Ma -Izlaz	L	A
Krešimirova	650	1320	611	623	58.88%
Luki	0	1931	27	470	5.74%
Zvonimirova2	1859	99	1786	1282	139.32%
Baraćeva	1155	698	1272	974	78.38%

Nezadovoljavajuća iskorištenost privoza Z2 na oba rotora odnosi se na dio Zvonimirove ulice koja povezuje ova dva rotora. Primjenom dvotračnih ulaza (kao u varijanti II2A) povećava se kapacitet ulaza te se iskorištenost privoza smanjuje na blisko zadovoljavajućih 80%. Izdvojene rampe za desne skretače (varijanta IIIA – zapadni kružni tok) neophodne su za zadovoljenje propusne moći privoza.

4.4. Opterećenost prometnih tokova ometanjima slobodnog toka

Tip čvorišta i način oblikovanja privoza određuje stupanj podređenosti prometnih smjerova aktivnostima obveznog zaustavljanja ili prestrojavanja u izdvojene prometne trake. Količina i vrsta tih aktivnosti pri prolasku kroz čvorište pojedinog smjera kretanja dat će mjeru ometanja slobodnog prometnog toka. Aktivnost obveznog zaustavljanja predstavlja veće ometanje slobodnog toka i ocijenjena je ocjenom 2, a aktivnost prestrojavanja ocjenom 1. Analiza svih prometnih smjerova po pojedinim varijantnim rješenjima [9] provedena je prema navedenom. Zbrajanjem ocjena pojedinih prometnih smjerova dobivena je ukupna ocjena varijantnih rješenja prikazana u tablici 5.

Tablica 5. Opterećenost prometnih tokova

Oznaka varijante	IIA	IIB	IIC	I2A	I3A	III A	II2A
Ukupna ocjena	52	53	51	68	69	78	89

Niža ukupna ocjena može se tumačiti i kao relativna ocjena veće sigurnosti odvijanja prometa, a u uvjetima dovoljne propusne moći privoza, i kao relativna ocjena veće propusne moći varijantnog rješenja. Viša ukupna ocjena predstavlja veću opterećenost slobodnog toka prometa i veću složenost varijantnog rješenja. Varijante tipa I poput poludeniveliranih čvorišta (manji broj zaustavljanja prometnog toka) očekivano imaju povoljnije ocjene u odnosu na varijante tipa II koje su raskrižja u nivou.

5. Usporedba i kratki komentar varijantnih rješenja

Izbor relevantnih kriterija, vrednovanje varijantnih rješenja i izbor povoljnog varijantnog rješenja su složeni i vrlo osjetljivi zbog raznorodnosti i različite važnosti relevantnih kriterija. U ovom radu i posebno u [9] iznesen je niz podataka kojima se može izvršiti kvalitetna usporedba varijantnih rješenja. Tablica 6. po autorima usporedno prikazuje značajnije karakteristike varijantnih rješenja uz dodatne komentare.

Tablica 6. Usporedna tabela varijantnih rješenja

UVJETI	I 1	I 2	I 3	II 1	II 2
„Slobodan“ položaj izlaznog portala tunela	+	+	+	+	+
Zadržavanje benzinske postaje Mlaka	-	+	+	+	+
Zatvaranje zapadnog privoza Ulice LUKI	+	+	+	+	-
Prihvatljiva trasa ulice Riva	ABC	AC	A	AC	AC
Rušenje postojećih objekata	-	++	++	+	+
Parkirališna površina	-	-	+	-	-
Zvonimirova sa 4 trake	-	-	-	-	-
Izmještanje komunalnih instalacija	-	-	-	+	+
Semaforizacija	-	-	+	-	-
Direktan smjer kretanja Tunel-Zvonimirova	+	+	+	+	-
Odvojen javni prijevoz	+	-	-	-	-
Prestrojavanje i zaustavljanje	+++	++	++	+	-

Poštivanje postojeće izgrađenosti na području čvorišta može se promatrati kroz potrebu rušenja postojećih objekata, mogućnost zadržavanja benzinske postaje i parkirališta te potrebu izmještanja komunalnih instalacija. Varijante I2 i I3 najbolje se uklapaju u postojeći prostor, ali ni približno ne zadovoljavaju planirane potrebe prometa te se mogu ocijeniti neprihvatljivima. Varijantna rješenja tipa II (kružno raskrižje) se povoljnije uklapaju u postojeće stanje i možemo ih ocijeniti građevinski, odnosno prostorno prihvatljivijima.

Pozicija izlaznog portala tunnelske obilaznice ne utječe bitno na izbor tipa čvorišta, ali ne omogućava formiranje direktnog smjera Zvonimirova zapad – Tunel što može biti bitno ograničenje usvojenog rješenja. U svim varijantnim rješenjima pokazala se potreba formiranja izdvojenih prometnih tokova vezanih za izlazni portal tunela.

Izbor trase nastavka ulice Riva pokazao se elementom koji će bitno utjecati na izbor konačnog rješenja jer prikazana rješenja ne podržavaju sve predložene smjerove dolaska na lokaciju čvorišta.

Za Ulice Luki i Podmurvice u svim je varijantnim rješenjima predviđena prereregulacija prometa koju je potrebno ukomponirati u varijantno rješenje. Uvjet zadržavanja benzinske postaje moguće je ispuniti, ali na ovoj lokaciji svakako predstavlja ograničavajući element.

Varijantna rješenja tipa I (poludenivelirano čvorište) najbolje zadovoljavaju potrebe javnog gradskog prijevoza.

Kako je proračun kapaciteta pokazao da niti jedno varijantno rješenje ne može u potpunosti zadovoljiti predviđene prometne potrebe, nisu se razmatrale daljnje analize i vrednovanja u cilju odabira povoljne varijante. Pri tome su rješenja tipa II prometno složenija, odnosno pokazuju veću opterećenost slobodnog prometnog toka.

6. Zaključak

Prvi dojmovi o uvjetima na lokaciji su povoljni i daju naslutiti da oblikovanje čvorišta neće biti zahtjevno. Veličina slobodnog prostora omogućava razvijanje različitih tipova čvorišta što je i prikazano varijantnim rješenjima.

Predviđeno prometno opterećenje ove lokacije je značajno te se potreba za postizanjem odgovarajuće propusne moći čvorišta pokazala kao ključni faktor pri ocjeni povoljnosti predloženih rješenja. U radu prikazano prometno opterećenje dobiveno je grubom preraspodjelom postojećeg opterećenja na prvom i drugom longitudinalnom prometnom pravcu. Za realnije prometno opterećenje potrebna je detaljnija analiza kojom bi se obuhvatila daleko šira prometna mreža i uključili različiti scenariji i dinamika razvoja.

Iako je čvorište Mlaka do sada projektno razrađeno u većem broju varijanti, a od postavljanja koncepcije prošlo je već dvadeset godina, mora se zaključiti da rješenje koje bi zadovoljilo buduće prometne i prostorne potrebe nije dobiveno. Ostaje otvoren prostor za ispitivanje i drugih mogućnosti, a varijanta koju bi svakako trebalo projektno provjeriti odnosi se na produljenje zapadne dionice trećeg koridora „dublje“ u zonu Mlake kako bi se postigao kraći spoj s planiranom lučkom spojnom cestom D403. Međutim, odgovor kojim će se dobiti najprihvatljivije rješenje treba vjerojatno tražiti predviđajući novu paradigmu razvoja grada koja će se dogoditi kao posljedica očekivanih promjena. Ove očekivane promjene odnose se na više segmenata funkcioniranja grada, a prvenstveno na:

- prenamjenu površina Mlake iz današnjih industrijskih i tvorničkih u nove gospodarske namjene (mogućeg širokog raspona od zanatskih i uslužnih do komunalno servisnih i lučko nautičkih),

- realizaciju novih namjena koja je već pokrenuta i bit će dovršena u narednih desetak godina (radi se o izgradnji novog lučkog terminala na Zagrebačkoj obali uz koju je povezana izgradnja državne lučke spojne ceste D403 i rekonstrukcija postojećeg željezničkog kolodvora),

- ostvarenje jakog pozitivnog pomaka u korištenju i kvaliteti javnog gradskog prijevoza planiranim mjerama (kao što su uključivanje željeznice i sezonskog pomorskog prijevoza u sustav, primjena park&ride-a, i drugo), ne samo radi smanjenja broja osobnih vozila koja dolaze u grad već i zbog postizanja ekoloških i ekonomskih pogodnosti.

7. Literatura

- [1] Generalni urbanistički plan Grada Rijeke, Grad Rijeka, Sl.N. 07/07,2007
- [2] Detaljni urbanistički plan centra grada Rijeke, Shankland Cox and Associates, London, i Urbanistički institut Rijeka, Rijeka, 1971. g.,
- [3] Idejno prometno i građevinsko rješenje rekonstrukcije i dogradnje drugog longitudinalnog koridora u centru Rijeke – dionica od raskrižja s Ulicom I. Grohovca do raskrižja s Ulicom F. Čandeka, Građevinski Institut, OOUR Fakultet graditeljskih znanosti Rijeka, 1989.g.
- [4] Provedbeni urbanistički plan centra grada Rijeke, Zavod za razvoj, prostorno planiranje i zaštitu čovjekova okoliša u Rijeci, Rijeka, 1992.g.
- [5] Zaobilaznica centra grada Rijeke, idejna rješenja, naručitelj Zavod za razvoj, prostorno planiranje i zaštitu čovjekova okoliša u Rijeci, izradio Institut građevinarstva Hrvatske Poslovni centar Rijeka Odjel prometa, Rijeka, Rijeka, 1994.g.
- [6] Brojenje prometa, Institut građevinarstva Hrvatske d.d. Poslovni centar Rijeka, br. pr. IGH-55400-557/07, Rijeka, kolovoz 2007.,
- [7] Brojenje prometa, Institut građevinarstva Hrvatske d.d. Poslovni centar Rijeka, br. pr. IGH-55400-557/08, Rijeka, prosinac 2008.,
- [8] J. Kordić. Varijantna rješenja nastavka Ulice Riva u Rijeci, diplomski rad Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka,2010.
- [9] S. Barić. Varijantno rješenje čvorišta Mlaka, diplomski rad Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka,2010.
- [10] Smjernice za projektiranje i opremanje raskrižja kružnog oblika – rotora, Institut prometa i veza, Zagreb, kolovoz 2002.

PROMETNO RJEŠENJE PODRUČJA KAMPUS- -KLINIČKI BOLNIČKI CENTAR NA TRSATU U RIJECI

TRAFFIC SOLUTION FOR UNIVERSITY CAMPUS- -CLINICAL HOSIPTAL CENTRE IN TRSAT IN RIJEKA

Iva Baričević*, Srdan Škunca**, Aleksandra Deluka-Tibljaš*

Sažetak. Sveučilišni Kampus na Trsatu u Rijeci, smješten unutar izgrađenog dijela naselja Trsat, u smislu organizacije prometa predstavlja složen zadatak. Neophodno je u promišljanje prometnog sustava uzeti u obzir postojeće planove Kampusu i Kliničkog-bolničkog centra kao i suvremene tendencije u razvoju prometa u gradovima i specifično na kampusima. U ovom radu se prikazuje moguće prometno rješenje za Kampus Sveučilišta u Rijeci kojim se respektira potreba osiguravanja prometne dostupnosti ovoga područja na ekološki održiv način koji uključuje smirivanje prometa u zoni, javni gradski prijevoz i uvođenje biciklističkog prometa.

Ključne riječi: sveučilišni kampus, prometni sustav, smirivanje prometa, biciklizam

Abstract. University Campus in Trsat in Rijeka is situated in the built part of Trsat. Therefore, traffic organization is a complex task and planning of the transport system must take into account the existing plans for the New Campus and Clinical Hospital as well as contemporary trends in the development of transport in the cities and specifically on campuses. This paper presents a possible solution for the Campus of the University of Rijeka, which respects the need to ensure accessibility to this area in an environmentally sustainable manner which includes traffic calming in the area, public transport and the introduction of bicycle traffic.

Key words: university campus, mobility plan, traffic calming, cycling

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: iva.baricevic@gradri.hr, deluka@gradri.hr

** Grad Rijeka - Odjel gradske uprave za razvoj, urbanizam, ekologiju i gospodarenje zemljištem, Titov trg 10, Rijeka
E-mail: srdjan.skunca@rijeka.hr

1. Uvod

U procesu prometno-prostornog planiranja neophodno je respektirati međuovisnost namjene prostora, prometne potražnje i prometnog sustava. Adekvatan prometni sustav može povećati vrijednost prostora kojem se dodjeljuje nova namjena, dok će neadekvatni prometni sustav dovesti do smanjenja pristupačnosti, a posljedično i vrijednosti istoga. Rješavanje ovog problema u slučajevima kada se novi sadržaji-namjene planiraju unutar postojećeg urbaniteta vrlo je složen postupak [1].

Smještaj Sveučilišnog Kampusa i Kliničkog bolničkog centra u Rijeci (u daljnjem tekstu KBC) na prostorima bivše vojarnje unutar naselja Trsat jedan je od takvih, složenih, problema. Obje djelatnosti (obrazovna, zdravstvena) imaju određene specifičnosti s obzirom na svojstva korisnika i način organizacije rada. Planskom se dokumentacijom, dijelom već i realiziranom, smještaju na kontaktu dva stambena naselja (Trsat i Vežica) i prometno oslanjaju na relativno skromnu postojeću cestovnu infrastrukturu[2,3,4].

Tendencije u razvoju prometnih sustava u gradovima [5,6] koje neposredno utječu i na način razvoja prometnih sustava sveučilišnih kampusa okrenute su poticanju održivih vidova prometa koji dugoročno jamče smanjenje štetnog utjecaja prometa na okoliš.

U radu je obrazložen prijedlog dugoročnog prometnog rješenja [7] kao mogućeg prometnog rješenja navedene zone uz respektiranje potrebe da Kampus-KBC postane zona smirenog prometa koja korisnicima osigurava primjerenu razinu sigurnosti i prometne uslužnosti nakon izgradnje svih planiranih objekata. Rješenjem se pokušava iskoristiti prednost Sveučilišnog Kampusa kao potencijalnog mjesta generiranja novih ideja, u ovom slučaju na primjeru promoviranja održivih vidova prometa javnog gradskog prijevoza i alternativnog vida prometovanja – biciklizma.

Rad ne ulazi u analizu i diskusiju postojećeg prometnog rješenja u zoni.

2. Inozemna iskustava u prometnom povezivanju sveučilišnih kampusa

Usporedba inozemnih iskustava [9,10,11,12] organizacije prometnih sustava na kampusima upućuje na vrlo različite principe organizacije prometa na područjima sveučilišnih kampusa ovisno o tome radi li se o europskim ili pak američkim ustanovama što ne iznenađuje s obzirom na općenito različite prostorne uvjete u gradovima i, posljedično, prometne navike.

Gradovi u Sjedinjenim američkim državama se, u prometnom smislu, mogu okarakterizirati kao područja dominacije osobnih automobila kojima su onda prioritetno usmjereni i prometni planovi i implementirana prometna rješenja. Uobičajeni tip američkog grada u literaturi se naziva i „automobilskim gradom“ jer ga karakteriziraju vrlo povoljni uvjeti za motorni promet te manje zastupljen javni i osobito nemotorizirani promet [8].

Posljednjih desetljeća opisani koncept doživljava promjene u korist održivih vidova prometa i to prvenstveno zbog problema koje promet kao trenutno najveći generator zagađenja zraka izaziva okolišu.

U Sjedinjenim američkim državama se kampusi (u originalu *college campuses*) prepoznaju kao pogodna mjesta za razvoj novih prometnih politika s obzirom na to da su njihovi korisnici mlađa populacija spremnija na promjene i prihvaćanje alternativnih rješenja. U svjetlu navedenog, oblikovanju prometnih i javnih površina unutar kampusa se posvećuje sve veća pažnja [9,10]

Tijekom 2001. godine na 8 američkih kampusa (koji su odabrani među 3000 kampusa vrednovanjem njihove primjerenosti i prilagođenosti biciklističkom i pješačkom prometu) provedeno je opsežno prometno istraživanje [9] sa ciljem utvrđivanja razdiobe dnevnih putovanja prema vidovima prometa (*modal split*) i drugih prometnih pokazatelja. Analizirane su i prometne politike te aktivnosti koje se poduzimaju u cilju promoviranja održivih prometnih sustava na tim kampusima. Istraživana sveučilišta značajno se razlikuju u broju studenata, radi se o sveučilištima u rasponu od 14.000 (Sveučilište Stanford, California) do 43.000 studenata (Sveučilište Madison, Wisconsin). Od 8 analiziranih sveučilišta njih 6 je smješteno u urbanom području koje je zbog koncentracije ljudi i aktivnosti prometno uvijek problematičnije od područja izvan grada ili predgrađa. Kao polazište za promišljanje prometnog sustava na novom kampusu u Rijeci mogu se, uz uvažavanje različitosti, eventualno smatrati primjeri kampusa u Boulderu (Colorado), Sveučilište Stanford i Sveučilište Eugene (Oregon) koji obzirom na lokaciju i broj studenata do neke mjere odgovaraju onome što se planira na riječkom Kampusu. Stoga su osnovni prometni pokazatelji za ova sveučilišta prikazani u Tablici 1.

Podaci ukazuju na to da sva tri navedena kampusa bilježe značajan udio biciklističkog prometa u dnevnim putovanjima. Iako je klima na Sveučilištu Boulder relativno nepovoljna, 12% studenata i zaposlenika dolazi biciklom, a njih još 28% pješice te 24% javnim gradskim prometom. Treba napomenuti da se radi o sveučilištu koje je uključeno u program grada Boulder nazvan „Ecopass“ koji omogućava besplatni javni gradski prijevoz svim zaposlenicima koji imaju identifikacijsku karticu sveučilišta [9]. Sveučilište Stanford odskaka u podacima brojem parkirnih mjesta na 1000 korisnika jer osigurava čak 921

parkirno mjesto (PM) na 1000 studenata i nastavnika. No, suvremeni ekološki problemi kojima je uzrok motorni promet (buka, zagađenje..) to su sveučilište ponukali da uvede novčanu nagradu za zaposlenike koji ne kupuju mjesečnu parkirnu kartu kako bi destimulirali korištenje automobila.

Tablica 1. Osnovni pokazatelji prometne organizacije na odabranim američkim sveučilišnim kampusima [9]

Kampus	Sveučilište Boulder (Colorado)	Sveučilište Stanford (California)	Sveučilište Eugene (Oregon)
Lokacija	Urbano područje	Urbano područje	Urbano
Broj studenata	26.000	14.200	17.300
Broj zaposlenika	5.000	8.600	3.500
Klimatski uvjeti	Različiti klimatski uvjeti u 3 sezone	Povoljni cijele godine	Različiti klimatski uvjeti u 3 sezone
Reljef	Relativno povoljan	Povoljan	Povoljan
% putovanja biciklom	12	24	12
%pješačkih putovanja	28	8	27
% putovanja JGP	24	4	16
% putovanja automobilom	36	64	45
Broj PM	10.500	21.000	3300
Broj Pm/1000 osoba	338,7	921.1	239.8

Analiza cjelovitih podataka [9] pokazuje da udio pješačkih i biciklističkih putovanja u ukupnoj razdiobi prometa (*modal split*) ovisi o položaju kampusa i klimi te topografiji. U pravilu je udio pješačkih i biciklističkih putovanja veći u „gradskim“ kampusima, dok je udio ovih vidova prometa manji na kišovitim područjima. Grad Seattle koji je smješten na relativno nepovoljnom terenu ima najmanji udio biciklističkog prometa od svih analiziranih sveučilišta.

Bez obzira na tradicionalnu percepciju američkog grada kao „automobilskog“ odnos udjela putovanja ostvarenih automobilom i održivih vidova (nemotorizirani, JGP) na sveučilištima varira od 23:77 u korist održivih vidova prometa na Sveučilištu Madison do 64:36 na Sveučilištu Stanford. Ovdje treba napomenuti da nepovoljniji scenarij razvoja prometnog sustava u Rijeci predviđa ovaj omjer 60:40 čime se Rijeka s obzirom na razvoj prometnog sustava prema navedenom scenariju može svrstati u grupu „automobilskih“ gradova što nije tendencija koju treba podržavati [2].

U radu koji analizira mogući način organiziranja održivog sustava parkiranja na Sveučilištu u Coimbri (Portugal) [11] navodi se problem organizacije prometa ovoga sveučilišta koje je smješteno u kampusu unutar povijesne jezgre grada. Zaključci rada upućuju i u ovom slučaju na potrebu reorganizacije postojećih resursa u smjeru omogućavanja kvalitetnijih veza kampusa s okolnim naseljima javnim gradskim prijevozom. Neovisno sveučilište u Barceloni poduzima niz aktivnosti usmjerenih na smanjivanje udjela individualnog prometa u *modal splitu* Sveučilišta. Prema posljednjim podacima o ovom sveučilištu smještenom u predgrađu Barcelone, 41% dnevnih putovanja odvija se javnim gradskim prijevozom, a cilj je da se ovaj udio poveća [12].

Kroz sve analizirane radove [9, 10, 11, 12] provlači se ideja o potrebi implementiranja održivih vidova prometa za povezivanje kampusa s okolnim naseljima kao i potreba zajedničkog rješavanja prometa kampusa i okolnih gradskih zona i gradova. Sveučilišta se uključuju u gradske inicijative poticanja korištenja javnog i nemotoriziranog prometa na različite načine: sufinanciranjem kupnje bicikla, plaćanjem ili sufinanciranjem karte za JGP i sl.

Iz navedenog se može zaključiti da postoje različiti modeli poticanja pojedinaca i institucija unutar akademske zajednice na promišljanje vlastitih prometnih navika, odnosno, politika. Poticaji dolaze s lokalne razine (gradovi), a modeli implementacije se razvijaju kroz prometne politike samih sveučilišta.

3. Prostorno-planske osnove lokacije Sveučilišnog kampusa i KBC-a

Lokacija Sveučilišnog kampusa i Kliničkog bolničkog centra određena je Prostornim planom uređenja grada Rijeke donesenim u studenom 2003. godine, unutar građevinskog područja oznake GP-20, a obuhvaća glavninu površine nekadašnje vojarne Trsat, dio koje, površine oko 3,2 ha, je namijenjen i razvoju Kliničkog bolničkog centra u neposrednom istočnom nastavku Kampusa. Bio je to dovršetak procesa započetog još 1999. godine kada je Grad Rijeka započeo intenzivno zagovarati ideju prenamjene tadašnje vojarne na Trsatu u područje namijenjeno rješavanju prostornih potreba Kliničkog bolničkog centra i riječkog Sveučilišta. Prvi stvarni uspjeh postignut je već u postupku izrade i donošenja Prostornog plana Primorsko-goranske županije (2001.) kada je tadašnja vojarna, uz odobrenje Ministarstva obrane, izuzeta iz popisa građevina od važnosti za potrebe obrane.

Usporedo s radom na Prijedlogu Prostornog plana uređenja i Generalnog urbanističkog plana grada Rijeka [2], Odjel gradske uprave za urbanizam, ekologiju i gospodarenje zemljištem, u suradnji s Arhitektonskim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu, izradio je 2001. godine program izgradnje kampusa

riječkog sveučilišta na području bivše vojarnje Trsat. Bila je to prva provjera prostornih mogućnosti i ujedno dimenzioniranje toga prostora za potrebe smještaja Sveučilišta.

Konačno, u prosincu 2001. godine, kada je održana prva rasprava, te u razdoblju siječanj-ožujak 2002. godine, kada je održana opsežna javna rasprava o Prijedlogu Prostornog plana uređenja grada Rijeke i Generalnog urbanističkog plana, opća i stručna javnost i službeno je suočena s prijedlogom i značajem novih namjena: sveučilišta i bolnice, koje javnost jednodušno podržava.

Vrlo brzo po donošenju Prostornog plana uređenja grada Rijeke, Povjerenstvo Vlade za upravljanje imovinom Republike Hrvatske je 9. prosinca 2003. godine donijelo odluku o prijenosu postojećih zgrada i zemljišta vojarnje Trsat Gradu Rijeci, a u svrhu izgradnje nove bolnice i Sveučilišnog kampusa.

Donošenjem Generalnog urbanističkog plana grada Rijeke [2], 2007. godine, detaljnije su određene površine namijenjene izgradnji Sveučilišnog kampusa i Kliničkog bolničkog centra, uvjeti gradnje i uređenja, način provedbe kao i drugi uvjeti značajni za daljnje planiranje koje je nastavljeno kroz postupak provedbe Javnog natječaja za idejno urbanističko-arhitektonsko rješenje područja Kampusa Sveučilišta u Rijeci, 2003. godine, a potom i izradom i donošenjem Detaljnog plana uređenja Sveučilišnog kampusa i Kliničkog bolničkog centra na Trsatu, 2005. godine [3].

Planiranje Sveučilišnog kampusa, kao tipologije rješenja smještaja sveučilišnih sadržaja, rezultat je višestrukih analiza stanja i razvojnog potencijala mreže građevina i lokacija te uloge sveučilišne funkcije na mikro i makrorazini, provedenih u funkciji izrade Prostornog plana uređenja grada Rijeke i Generalnog urbanističkog plana, a koje su ukazale na poddimenzioniranost postojećih objekata i nemogućnost da se njihovim zadržavanjem stvori sustav koji će djelovati poticajno i na razvoj Sveučilišta i na razvoj Grada.

Unutar vizije dugoročnog razvoja Grada Rijeke, jedno od najvažnijih uporišta predstavlja opredjeljenje prema njegovom razvoju kao znanstveno-obrazovnog i medicinskog središta. Unutar vizije urbanog razvoja, lokacija na Trsatu dio je koncepcije stvaranja novih singularnih prostornih žarišta metropolskog značaja. U ovom primjeru riječ je o stvaranju znanstveno-obrazovnog i medicinskog žarišta koje se oslanja na dovoljnu površinu područja, cestovnu mrežu u rasponu od gradskih do međunarodnih pravaca i, što nije manje važno, u specifičnom značenju i prepoznatljivosti kulturno-povijesne i vjerske dimenzije Trsata, koja na simboličkoj i stvarnoj razini nadilazi "granice" grada i koja stvara specifično i poticajno ozračje.

Uvođenje tipologije kampusa na plato Trsata i uopće, unutar sušačkog područja kao cjeline specifičnog razvoja gradske strukture, predstavlja samo po sebi uvođenje teme novog urbanog mjerila, adekvatnog sadržaju kojeg utjelovljuje, novih urbanih odnosa i nove socio-kulturne dimenzije prostora, što je vrlo značajno u kontekstu sagledavanja ukupnih prostornih odnosa grada, posebno u njegovom rubnom dijelu (u fizionomskom ali i stvarnom smislu) u kojem se, tragom zatečenih i nastanka recentnih struktura, mogao očekivati razvoj gotovo perifernih osobina.

4. Moguće rješenje prometnog sustava područja KBC-a i Kampusa – 2020. godina

U svrhu izrade prometnog rješenja područja Sveučilišnog kampusa i Kliničkog-bolničkog centra bilo je potrebno [7]:

- analizirati postojeće stanje lokacije,
- prikupiti relevantnu tehničku dokumentaciju,
- definirati planirano opterećenje prometne mreže,
- izraditi i ispitati varijante prometnih režima za zonu te
- izraditi prometna rješenja pojedinih dionica prometne mreže i njihovih raskrižja.

4.1. Područje sveučilišnog Kampusa i KBC-a u Rijeci

Područje Sveučilišnog kampusa i KBC-a smješteno je na Sušaku, na istočnom dijelu grada Rijeke.

Ovom širom prostornom cjelinom prolazi nekoliko državnih, županijskih i lokalnih cesta. Sjevernim djelom prolazi Riječka obilaznica (A7) koja se na čvoru Orehovica povezuje sa Autocestom Rijeka-Zagreb, južnim dijelom Jadranska magistrala (D8), a istočnim dijelom područja prolazi državna cesta D404. Najbliža veza Sveučilišnog kampusa i KBC-a na riječku obilaznicu je čvor Vežica. U planu je izgradnja cestovnog spoja područja Kampusa sa čvorom Orehovica na sjevernom dijelu područja Kampusa (Slika 1).

U 1. fazi izgradnje područja Kampusa na ovome je području izgrađen dio planirane Sveučilišne avenije koja sada čini zapadnu granicu Kampusa sa naseljem Trsat te produžetak postojeće Dukićeve ulice kojom se području Kampus-KBC prilazi s istočne strane (Slika 2). Cestovni pristup Kampusu iz smjera Centra grada Rijeke je trenutno moguće ostvariti dvama koridorima: Kumičićevom ulicom i Ulicom Tome Stržića preko Ulice Vjekoslava Dukića ili Bulevardom Oslobođenja i Šetalištem Joakima Rakovca kroz Sveučilišnu aveniju (Slika 2).



Slika 1. Položaj zone Kampusa i KBC-a u odnosu na gradsku i vangradsku mrežu prometnica nakon 1. faze izgradnje Kampusa



Slika 2. Prikaz mreže cesta koje omeđuju područje Sveučilišnog kampusa i KBC-a nakon 1. faze izgradnje Kampusa [2]

4.2. Definiranje prometnih potreba promatrane zone

Prometno opterećenje zone Kampus-KBC i raskrižja u obodnoj zoni definirano je na temelju podataka o brojanju prometa i provedenih brojenja prometa na određenim lokacijama. Temelj za definiranje modalne razdiobe putovanja po vidovima prometa za zaposlenike bile su postavke GUP-a grada Rijeke [2].

S obzirom da autorima nisu bila dostupna istraživanja vezana za definiranje razdiobe putovanja po vidovima na područjima sveučilišnih kampusa koji bi po svojoj lokaciji i načinu organizacije potpuno odgovarali Riječkom Kampusu provedeno je istraživanje prometnih navika budućih korisnika ovoga prostora tj. studenata. Anketa, koja je za cilj imala utvrđivanje prometnih navika studenata i služila definiranju prometnog opterećenja, je provedena na studentima Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, a rezultati provedene ankete prikazani su u slijedećem poglavlju.

4.2.1. Rezultati ankete prometnih navika budućih korisnika Sveučilišnog kampusa

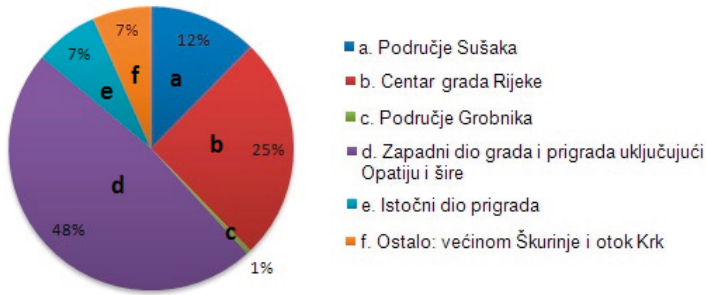
Kako bi dobili podatke o povećanju i distribuciji prometnog opterećenja, izgradnjom i useljavanjem pojedinih objekata Sveučilišnog kampusa, provedena je anketa putovanja studenata, kako je ranije navedeno, na studentima Građevinskog fakulteta u Rijeci. Anketa je provedena na uzorku nešto manjem od 200 studenata.

Rezultati ankete poslužili su utvrđivanju pokazatelja važnih za utvrđivanje prometne potrebe promatrane zone Kampus-KBC:

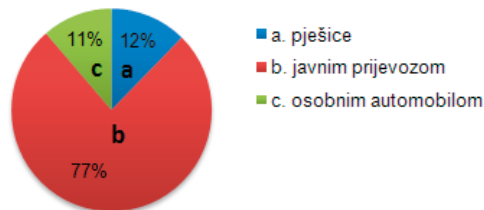
- mjesta prebivanja ispitanika u vrijeme studija;
- planiranog načina putovanja na Kampus;
- planiranog smjera dostupa Kampusu osobnim vozilima.

Rezultati ankete prikazani su na Slikama 3-5.

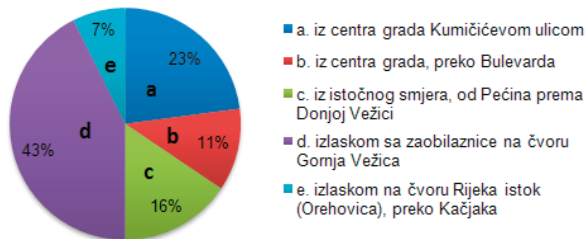
Rezultati provedene ankete pokazuju da najveći broj anketiranih studenata, njih 48 %, prebiva u zapadnom dijelu grada i prigrada. Sljedeći veći postotak studenata prebiva u centra grada, i to njih 25 %. Prilikom preseljenja fakulteta na Kampus najveći broj anketiranih planira putovati javnim prijevozom, 77 %, 12 % namjerava dolaziti pješice, dok svega njih 11 % planira koristiti osobni automobil. Udio onih koji namjeravaju dolaziti pješice odgovara udjelu studenata koji prebivaju na Sušaku. Ukoliko se ovi podaci usporede s podacima koji prikazuju prometne navike studenata i zaposlenika američkih sveučilišta (Poglavlje 2) može se uočiti da su, ne ulazeći u razloge, prometne navike riječkih studenata pozitivne jer su dominantno usmjereni na javni gradski prijevoz.



Slika 3. Područje prebivanja ispitivanih studenata [7]



Slika 4. Planirani način putovanja na Kampus – modal split [7]



Slika 5. Smjer dolaska na Kampus osobnim automobilom (za ispitanike koji su u prethodnom pitanju izjasnili da će dolaziti osobnim vozilom) [7]

Od svih ispitanih studenata koji su se izjasnili da će za dolazak na Kampus koristiti osobno vozilo njih 43% planira za pristup zoni Kampusu koristiti obilaznicu izlaskom na čvoru Vežica, što pretpostavlja ulazak u Kampus kroz Ulicu Vjekoslava Dukića ulicom. Iz smjera centra grada planira dolaziti 34 % studenata i to 23 % Kumičićevom ulicom, a 11 % preko Bulevarda Oslobođenja. Ovi su podaci korišteni kao temelj za distribuciju planiranih prometnih opterećenja. Podaci su korigirani u dijelu koji se odnosi na udio studenata koji će za dolazak na kampus koristiti osobna vozila. Pretpostavka je, naime, da će u idućem desetogodišnjem razdoblju doći do rasta materijalnog standarda studenata te je udio putovanja automobilom povećan. Predviđeno je da će 25% studenata za dolazak na Kampus koristiti osobni automobil (Tablica 3).

4.2.2. Rezultati brojanja prometa na raskrižjima

Brojanje prometa je provedeno na obodnim raskrižjima promatranog područja za koje autorima nisu bili dostupni relevantni podaci. Brojanje je provedeno radnim danom u tipičnim klimatskim uvjetima na prometno najopterećenijim raskrižjima na obodu zone: raskrižje Kumičićeve ulice i Ulice Slavka Krautzeka, Ulice Tome Strižića i Ulice Vjekoslava Dukića te Ulice Slavka Krautzeka i Marohničeve ulice (Slika 1). Prikupljeni podaci su dostupni u diplomskom radu [7].

4.2.3. Definiranje prometne potražnje

Podaci o broju nastavnika i studenata u 1. fazi izgradnje Kampusu su dobiveni neposrednim kontaktom sa Sveučilišnom službom izgradnje Kampusu, a podaci o planiranom broju studenata, nastavnika te administrativnog i pomoćnog osoblja za 2020. godinu (kraj 2. faze izgradnje Kampusu) preuzeti su iz DPU-a područja Sveučilišnog kampusu i KBC-a [3]. Navedeni podaci su prikazani u Tablici 2 za 1. fazu sumarno, a za drugu fazu pojedinačno i sumarno.

Tablica 2. Broj zaposlenika/studenata u Kampusu – po fazama izgradnje

Zgrada	Broj studenata	Broj osoblja
Ukupno – 1. faza	2019	783
Ekonomski fakultet	1408	92
Pomorski fakultet	885	147
Centar za temeljne medicinske zn.	1065	343
Kapelica, Rektorat, Sportski centar	-	52
Fakultet - planirani	360	44
Studentski smještaj*	1200	15
Ukupno – 2. faza (2020. godina)	3718	693

* Studenti korisnici smještaja na Kampusu nisu uzeti u obzir jer borave na analiziranom prostoru.

Podaci koji su uzeti u obzir pri konačnom definiranju prometne potrebe su i postojeći broj stanovnika unutar područja stambenog naselja Trsat (1100 stanovnika) te planski predviđeno povećanje korisnika prostora u svim segmentima od stanovanja, sporta i rekreacije okolne zone, a sve prema podacima iz DPU-a stambenog naselja Trsat [4].

U svrhu dobivanja prometnog opterećenja, mjerodavnog za odabir odgovarajućeg prometnog rješenja pojedinih raskrižja, bilo je potrebno

pretpostaviti stopu rasta postojećeg opterećenja s obzirom na demografske i ekonomske uvjete. Pretpostavljeno je prosječno godišnje povećanje prometnog opterećenja od 1,5%.

Na temelju ovako dobivenih podataka te uvođenjem pojedinih pretpostavki o načinu i smjeru putovanja koji slijede iz postojećih količina prometa i anketiranja studenata pretpostavljena je veličina budućeg opterećenja prometne mreže.

Kod proračuna prometnog opterećenja uzeta je u obzir varijanta koja podrazumijeva ekstremno nepovoljan *modal split*, odnosno izrazito velike udjele osobnih automobila u pristupu kampusu kako studenata (25%), tako i zaposlenika (60%). Na ovaj način su kroz analizu razina uslužnosti provjerene maksimalne vrijednosti prometnih opterećenja koje se mogu javiti u budućnosti (Tablica 3).

Tablica 3. Opterećenje za drugu fazu – Sveučilišni kampus [7]

Korisnici	Broj korisnika	Vrsta prijevoza	Modal split	Ukupno
Studenti	2019 + 3718	Osobni automobil	25,0 %	1435
	2019 + 3718	Javni prijevoz	75,0 %	4302
Osoblje	783 + 693	Osobni automobil	60,0 %	886
	783 + 693	Javni prijevoz	40,0 %	590
UKUPNO OSOBNIM AUTOMOBILOM				2321
UKUPNO JAVNIM PRIJEVOZOM				4892

Za relevantnu procjenu prometnog sustava Kampusa bilo je neophodno uzeti u obzir i prometna opterećenja koja će se pojaviti na susjednoj površini na kojoj je planirana izgradnja Kliničkog bolničkog centra. Zbog nedostupnosti podataka o broju zaposlenika, bolničkih kreveta i sl. procjena se temeljila na planiranim prometnim kapacitetima za parkiranje DPU-a (Tablica 4).

Tablica 4. Opterećenje (*modal split*) za korisnike KBC-a [7]

Broj PM	Vrsta prijevoza	Postotak	Ukupno
1750 + 214	Osobni automobil	65,0 %	1277
1750 + 214	Javni prijevoz	35,0 %	687

Nakon što je prometno opterećenje proračunato, raspodijeljeno je prema vršnim satima. Tablica 5 prikazuje raspodjelu prometa u mjerodavnom jutarnjem vršnom satu.

Svi navedeni i analizirani podaci bili su temelj za izračun planiranog opterećenja, njegove veličine i distribucije na prometnu mrežu, te proračun razina uslužnosti kritičnih raskrižja koje su osnova za predlaganje rekonstrukcije pojedinih raskrižja unutar promatrane mreže što je detaljno elaborirano u [7].

4.3. Analiza mogućih rješenja [7]

Uz preduvjet izgradnje svih objekata i cjelovite prometne mreže na analiziranom području za ciljnu godinu 2020., prometni je režim izveden u dvije varijante. Pri definiranju rješenja pretpostavljeno je da će do planske 2020. godine biti izgrađen sjeverni spoj područja Kampus-KBC s Riječkom obilaznicom, kružni tok na lokaciji Kačjak te sabirna ulica unutar naselja Trsat (Slika 7).

U 1. varijanti, zona Sveučilišnog kampusa pokušala se maksimalno tretirati kao zona smirenog prometa, što bi se osiguralo režimom prometa prema kojem je niz koridora predviđen za jednosmjerni promet. U ovoj varijanti su kao jednosmjerne predviđene slijedeće ulice: Mihanovićeve ulica i Marohničeva ulica jednosmjerne su u smjeru Kampusa, zatim Ulica Slavka Krautzeka jednosmjerna je od raskrižja sa Marohničevom ulicom u smjeru prema Sveučilišnoj aveniji te od istog raskrižja prema ulazu u KBC. Produžetak Ulice Vjekoslava Dukića jednosmjernan je iz smjera Sveučilišne avenije prema Ulici Tome Strižića. Analiza razina uslužnosti na obodnim raskrižjima pokazala je da rješenje prometno ne zadovoljava te se ova varijanta nije razrađivala [7].

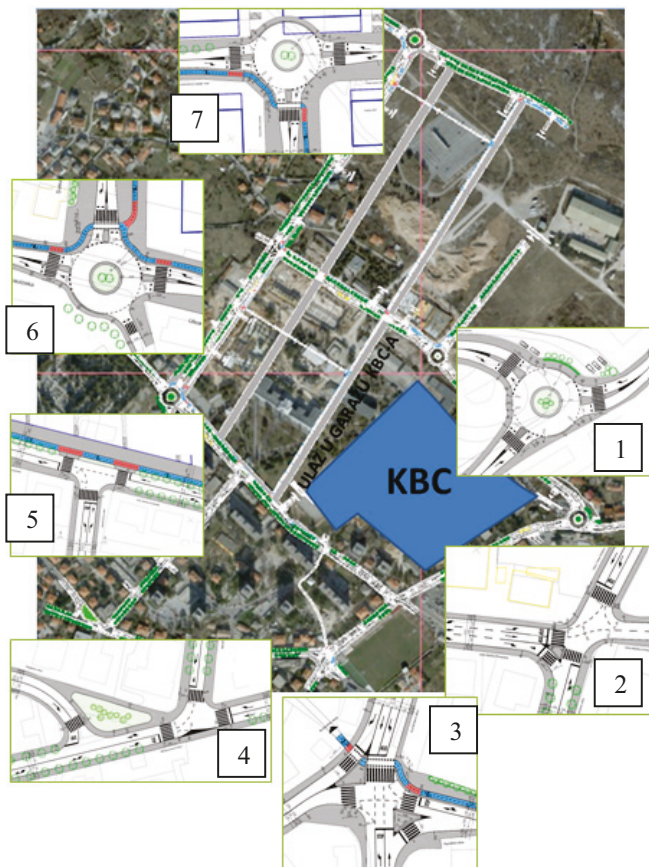
U 2. varijanti (Slika 7) predviđen je dvosmjerni promet Ulicom Vjekoslava Dukića u cijeloj dužini kao i dijelom Ulice Slavka Krautzeka od raskrižja sa Sveučilišnom avenijom do raskrižja sa Marohničevom ulicom. Time bi ova ulica služila za punjenje i pražnjenje Kampusa. Također bi se pražnjenje značajnog dijela opterećenja KBC-a vršio istim putem izvedbom dvosmjernog dijela prometnice od ulaza u podzemnu garažu KBC-a smještenu u Ulici Slavka Krautzeka do Sveučilišne avenije čime bi se rasteretile Ulica Tome Strižića i Kumičićeva ulica (Slike 6 i 7).

4.4. Opis usvojenog rješenja cestovne mreže

Proračun razine uslužnosti proveden je za mjerodavni jutarnji vršni sat. Na temelju rezultata proračuna razina uslužnosti doneseni su zaključci o potrebi rekonstrukcije pojedinih raskrižja. Proračun i rezultati su dostupni u diplomskome radu na kojem se ovaj rad temelji [7].

U cilju unaprijeđenja uvjeta odvijanja prometa u zoni Kampusu i KBC-a usvojena su sljedeća rješenja pojedinih raskrižja (Slika 8):

1. *Raskrižje Ulice Vjekoslava Dukića i Ulice Tome Strižića* – izvedba kružnog raskrižja vanjskog promjera 15,0 metara. Kao problem prilikom izvedbe ovoga rješenja pojavljuje se nagib Ulice Vjekoslava Dukića u odnosu na Ulicu Tome Strižića. Kako bi se ovo rješenje moglo provesti bilo je potrebno cijeli rotor predvidjeti u nagibu od 2,5% u smjeru sjever-jug. Uz to, visinu nivelete kolnika unutar rotora biti će potrebno podignuti oko 1,5 m.
2. *Raskrižje Ulice Slavka Krautzeka, Ulice Tome Strižića, Kumičićeve ulice i Ulice Martina Kontuša* – proširenje postojećeg semaforiziranog raskrižja (nemogućnost formiranje kružnog raskrižja radi izgrađenosti). Postojeći prometni traci su prošireni, a na privozu Ulice Slavka Krautzeka izvedeni su posebni prometni traci za lijevo, ravno i desno skretanje.
3. *Raskrižje Mihanovićeve ulice, Kumičićeve ulice i Radničke ulice* – proširenje privoza Kumičićeve ulice iz smjera Gornje Vežice uvođenjem posebnih traka za lijevo, ravno i desno skretanje.
4. *Raskrižje Mihanovićeve ulice, Marohnićeve ulice i Radićeve ulice* – postojeće K-raskrižje preoblikovalo bi se u dva trokraka raskrižja uz semaforizaciju glavnih prometnih tokova.
5. *Raskrižje Ulice Slavka Krautzeka i Marohnićeve ulice* – proširenje postojećeg trokrakog raskrižja te uvođenje dvosmjernog režima kretanja uzduž Ulice Slavka Krautzeka. Uvođenje posebnih traka na privozu Marohnićeve ulice za lijevo i desno skretanje.
6. *Raskrižje Ulice Slavka Krautzeka i Sveučilišne avenije* – izvedba kružnog raskrižja vanjskog radijusa 15,0 metara. Prilikom projektiranja rotora nisu uočene veće zapreke za izvedbu.
7. *Raskrižje Sveučilišne avenije, ceste prema Kačjaku i ceste prema stambenom naselju Trsat* - izvedba kružnog raskrižja vanjskog radijusa 15,0 metara. Područje je neizgrađeno tako da prilikom projektiranja rotora nisu uočene veće zapreke za izvedbu.



Slika 8. Predloženo prometno rješenje za drugu fazu Sveučilišnog kampusa i KBC-a [7]

Pokušaj vođenja cjelokupnog opterećenja KBC-a (garaža kapaciteta 1700 parkirnih mjesta) isključivo Ulicom Slavka Krautzeka pokazao se kao izrazito nepovoljno prometno rješenje koje uvjetuje niske razine uslužnosti na raskrižjima odnosno zasićenje pojedinih privoza. Jedno od mogućih rješenja ovoga problema je realizacija garažno-parkirnih objekata KBC-a na lokaciji izvan ovog užeg područja, a time i smanjenje kapaciteta planirane podzemne garaže u samoj zoni Kampusu i KBC-a (prikazano na Slici 6).

Ponudeno rješenje na više lokacija predviđa rješenje raskrižja kao kružnih. Kružna su raskrižja primijenjena na mjestima na kojima klasični tipovi raskrižja nisu zadovoljavali kapacitetom (raskrižje Ulice Tome Strižića i Ulice Slavka Krautzeka) te na glavnim cestovnim ulazima u zonu Kampusu kako bi se utjecalo na smirivanje prometa u zoni (Ulica Vjekoslava Dukića unutar Kampusu, sjeverni spoj na Sveučilišnu aveniciju). Detaljna prometno-građevinska rješenja svih zahvata dostupna su u diplomskome radu na kojem se temelji ovaj rad [7].

5. Sveučilišni Kampus na Trsatu – poligon za razvoj novih prometnih navika

Veliki broj korisnika na dnevnoj osnovi čini Kampuse značajnim generatorima prometne atrakcije, osobito kada su u većoj mjeri usmjereni na domicilne studente i kada, kao u slučaju riječkog Kampusu, unutar samoga kampusu nema smještajnih kapaciteta za sve ili veći dio studenata.

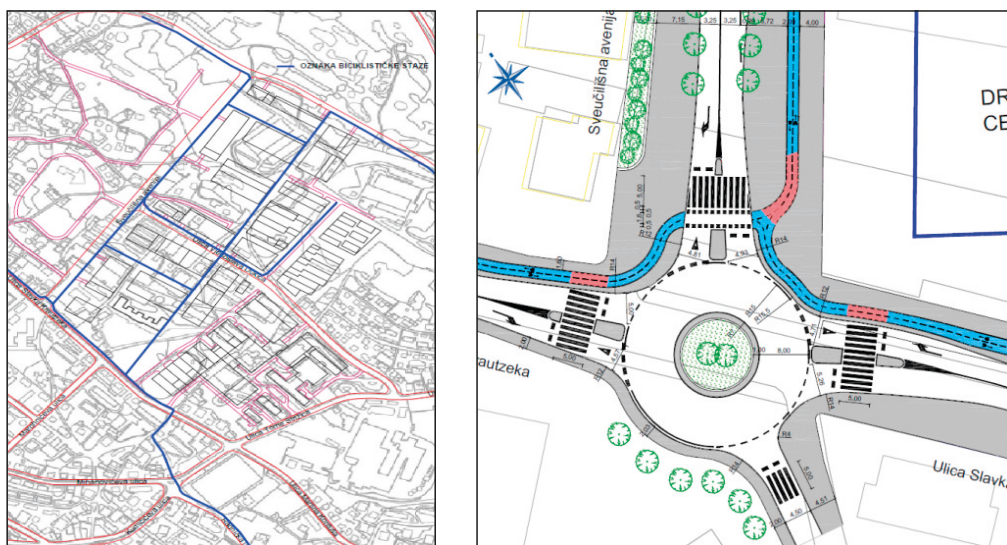
S obzirom na prirodu aktivnosti u sveučilišnim kampusima promet negativno utječe na sam život unutar kampusu što je bio razlog da se i na primjeru Kampusu u Rijeci pokuša unutar zadanih okvira osiguravanja uvjeta za motorni promet analizirati mogućnosti za optimalno rješavanje javnog prometa i uvođenje, za riječke prometne uvjete, alternativnog vida prometa – biciklizma. Analiza prakse američkih kampusu (a i europskih) opisana u poglavlju 2 ovoga rada upućuje na to da se i u zemlji tradicionalno orijentiranoj korištenju automobila okreću promoviranju alternativnih vidova prometovanja i u tome koriste različite metode.

Početak rada prvog fakulteta na Kampusu (Filozofski fakultet, siječanj 2011.) uvjetovao je reorganizaciju linija javnog prijevoza te se može uočiti da postavljeni sustav javnog gradskog prijevoza odgovara potrebama i da je potrebno voditi računa o njegovom nadograđivanju novim kapacitetima i, prema potrebi, linijama, paralelno s povećanjem broja putnika do kojeg će doći useljavanjem ostalih objekata.

Postojeća rješenja i planovi, međutim, uopće ne uzimaju u obzir mogućnost da se na Kampus dolazi biciklom jer nisu osigurane staze niti predviđena mjesta za sigurno parkiranje bicikla. Kao preduvjeti implementacije biciklističkog prometa u gradovima u teoriji se navode klimatski, topografski i uvjeti nadmorske visine [14]. Prema navedenim uvjetima Rijeka kao grad spada u relativno pogodne gradove za razvoj biciklizma jer udovoljava uvjetu nadmorske visine i klime, a nepovoljna je prema topografskim uvjetima. Sva dosadašnja iskustva uspješnog poticanja biciklizma [14] navode nekoliko bitnih elemenata: postavljanje sigurnih i, po mogućnosti, od motornog prometa odvojenih biciklističkih staza, osiguravanje uvjeta za sigurno parkiranje bicikla i organiziranje promotivnih aktivnosti usmjerenih prema mladima (učenicima i studentima) kao grupaciji koja je spremnija na prihvaćanje novina i kojoj je ovaj vid prometa i zbog fizičkih predispozicija primjereniji.

Unutar rješenja koje se opisuje u ovom radu [7] predviđeno je i rješavanje uvjeta za odvijanje biciklističkog prometa na pristupnim prometnicama prema Kampusu, kao i osnovna mreža staza unutar samog Kampusu (Slika 9). Prijedlog ima za cilj poticanje promišljanja mogućnosti sustavnog uvođenja

biciklista u gradski promet Rijeke bez obzira na objektivna topografska ograničenja. Kampus se u ovom slučaju prepoznaje kao mjesto pogodno za sustavno uvođenje biciklističkog prometa kako bi se potaklo studente (kao pogodnu dobnu skupinu) na korištenje bicikla u dnevnim dolascima na Kampus. Ovo se prvenstveno odnosi na 12% studenata koji prebivaju u istočnome dijelu grada, na Trsatu, Vežici i Pećinama. U radu nisu analizirane moguće trase biciklističkih staza u spomenutom području grada. Preliminarna je analiza pokazala da je postavljanje biciklističkih staza u smjeru Trsata, područja gradskog naselja Donja Vežica te dijelom Gornja Vežica i Pećine moguće.



Slika 9. Organizacija glavnih biciklističkih prometnica (A) i načina vođenja biciklističke staze u zoni raskrižja (B) [7]

6. Zaključak

Prometni sustav područja novog Sveučilišnog kampusa na Trsatu u Rijeci smještenog na području između stambene zone Trsata i Kliničkog bolničkog centra treba zadovoljiti kontradiktorne zahtjeve: osigurati dostupnost Kampusu po mogućnosti ekološki prihvatljivim vidovima prometa, ali i osiguravati tranzit prema susjednim zonama. Ovaj način organizacije prometnog sustava čini ga različitim od kampusa kakvi postoje u Sjedinjenim Američkim Državama. Bez obzira na navedenu različitost koja bitno otežava formiranje Kampusu na Trsatu kao zaštićene zone „smirenog“ prometa rješenjem koje je prikazano u ovom radu nastojalo se uspostaviti ekološki prihvatljivo rješenje koje korespondira

sa suvremenim tendencijama u razvoju kampusa kao mjesta pogodnih za implementaciju novih prometnih koncepata dominantno orijentiranih prema nemotoriziranom i javnom prometu. Obodna raskrižja su predviđena kao kružna kako bi se osigurala protočnost, ali i smanjenje brzine vozilima koja ulaze u područje Kampusu, predviđen je javni gradski prijevoz kao i biciklistički pristupi Kampusu sa svih glavnih cestovnih smjerova.

Sljedeći koraci na Sveučilištu bi svakako trebali ići u smjeru definiranja mjera (politika, strategija) kojima će se poticati studente, ali i zaposlenike na korištenje ekološki prihvatljivih vidova prometa te planiranju mreže biciklističkih staza prema susjednim naseljima.

Zahvala. *Diplomski rad na kojem se temelji ovaj rad proizašao je iz suradnje Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci sa Odjelom gradske uprave za razvoj, urbanizam, ekologiju i gospodarenje zemljištem Grada Rijeke.*

7. Literatura

- [1] Maletin, M., *Gradske saobraćajnice*. Građevinski fakultet Beograd, Beograd, 1996.
- [2] *Generalni urbanistički plan grada Rijeke*. Grad Rijeka, 2007. (Sl. N. 07/07)
- [3] *Detaljni plan uređenja područja Sveučilišnog kampusa i Kliničkog bolničkog centra na Trsatu*. Grad Rijeka, (Sl. N. 29/05)
- [4] *Detaljni plan uređenja područja stambenog naselja Trsat*. Grad Rijeka, 2009.(Sl. N. 29/09)
- [5] Goldman, T., Gorham, R., *Sustainable urban transport: Four Innovative direction*. *Technology in Society*, 28: 261-273, 2006.
- [6] Deluka-Tibljaš, A.; Lučić, S.; Benigar, M., *Nemotorizirani promet - ekološki prihvatljivo rješenje za promet u gradovima*. *Suvremeni promet*, 23: 333-337, 2003.
- [7] Baričević, I., *Analiza prometnog rješenja područja Kampus-KBC Rijeka u Rijeci* – diplomski rad. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2010.
- [8] Pasarić, M., *Problematika automobilske individualnog prometa u životu grada*. Filozofski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (http://infoz.ffzg.hr/afric/MetodeII/Arhiva02_03/PasarićM.htm)
- [9] Balsas, C., *Sustainable transportation planning on college campuses*. *Transport policy*, 10: 35-49, 2003.

-
- [10] Gumperecht, B., *The campus as a public space in the American college town*. Journal of Historical Geography, 33:72-103, 2007.
- [11] Barata, E., Cruz, L., Ferreira, JP., *Parking at the UC campus: Problems and solutions*. Cities, 2011 (article in press)
- [12] Miralles-Guasch, C., Domene, E., *Sustainable transport challenges in a suburban university: The case of the Autonomous University of Barcelona*. Transport Policy, 17: 454-463, 2010.
- [13] Ceste –Rijeka: <http://213.202.70.68/ceste-rijeka/ceste-rijeka.phtml>
- [14] Benigar, M., Deluka-Tibljaš, A., *Preduvjeti organiziranja biciklističkog prometa u gradovima*. Informatologija, 3-4: .283-287, 2001.

PRIMJENA GIS-A U IZRADI KATASTRA ZIDOVA I PROPUSTA NA ŽUPANIJSKIM CESTAMA

GIS IMPLEMENTATION IN PREPARING WALL AND CULVERT CADASTRE ON COUNTY ROADS

Kristijan Ljutić, Sergije Babić, Vedran Jagodnik

***Sažetak.** Geografski informacijski sustav (GIS) koristi se u širokom spektru aktivnosti, pa tako i u izradi katastra. U ovom radu dan je prikaz provedbe prikupljanja, pripreme i obrade podataka za potrebe izrade elaborata Katastar zidova i propusta na županijskim cestama Ž5064 i Ž5017 (Građevinski fakultet u Rijeci). Okolnosti u kojima se provodio stručni rad zahtijevale su posebnu organizaciju i pripremu aktivnosti. U tu svrhu izrađen je niz podloga prikladnih za terenski rad, a za potrebe smanjenja vremena utrošenog na lociranje i evidentiranje objekata izrađen je geooznačeni foto i video zapis trase ceste. U nedostatku sofisticirane opreme provedeni su ispitivanje i analiza pristupačne opreme za snimanje kao i ispitivanje računalnih programa u cilju iznalaženja optimalnih parametara za prikupljanje i obradu podataka. Skup rasterskih i vektorskih podataka, kao i foto i video dokumentacija, prilikom obrade međusobno su usklađeni korištenjem GIS i CAD aplikacija uz aplikaciju za obradu video zapisa. U radu su tako opisane mogućnosti korištenja i međusobnog povezivanja srodnih, ali i različitih aplikacija i uz to vezana uporabljivost formirane baze podataka, kao i mogućnost njezina daljnjeg unaprjeđenja u vidu monitoringa stanja određene karakteristike uz histogram promjena. Metodologija prikupljanja podataka, njihova obrada te naposljetku i priprema za daljnje kontinuirano korištenje, korisna je i primjenjiva na daljnjim poslovima slične vrste, a dobivena baza podataka može se primijeniti pri korištenju različitih analiza snimljenog stanja u prostoru.*

Ključne riječi: GIS, katastar, održavanje cesta, baze podataka, monitoring

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: {kristijan.ljutic, sergije.babic, vedran.jagodnik}@gradri.hr

Abstract. *The geographical information system (GIS) has a wide range of uses including cadastre preparation. This paper deals with gathering, preparation and processing of data required for completing a feasibility study under the title Wall and Culvert Cadastre on County Roads Ž5064 and Ž5017 (Faculty of Civil Engineering in Rijeka). The circumstances under which the study was conducted required a special organization and preparation of activities. Therefore, both a series of bases for field work and geotagged photo and video recording of the road route for reduction of time spent on placing and recording the structures were created. Due to lack of sophisticated equipment, the analysis of the available equipment for recording and computer program analysis was conducted in order to create optimal parameters for data collection and processing. All the spatial and vector data as well as the photo and video documentation were synchronized during the processing by using the GIS and CAD applications together with the application for video recording processing. The paper also describes the possibilities of using and correlating both similar and different applications and the related applicability of created data base. There is a possibility for further improvement of the current database, that is, the specific characteristic state recording along with the change histogram. The data gathering methodology, the processing methodology, and eventually the preparation for further continuous use are useful and applicable to other similar activities while the obtained data base can be used for different analyses of the recorded state in the area.*

Key words: *GIS, cadastre, road maintenance, data bases, monitoring*

1. Uvod

Izrada elaborata Katastar zidova i propusta na županijskim cestama Ž5064 (Križišće - Novi Vinodolski, 23,4 km) [1] i Ž5017 (Rupa - Orehovica, 25,4 km) [2] predstavljala je niz specifičnih aktivnosti za koje je bilo nužno osmisliti metodologiju. Obzirom da je bilo potrebno prikupiti i procesuirati prostorne i opisne podatke i informacije iz mapa, fotografija i snimaka s terena, pohraniti ih, pretraživati i obraditi, zatim interpretirati njihovu povezanost te naposljetku dati prikaz izvješća, mapa i rezultata – ovdje u potpunosti govorimo o zadatku prikladnom za obradu GIS alatom [3].

U radu su navedene specifičnosti objekata koji se snimaju, predviđena potrebna oprema za snimanje i mjerenje te su opisani obrasci osmišljeni za prikupljanje podataka s terena. Opisane su i mape (podloge) pripremljene za prikupljanje terenskih podataka. Za kasniju računalnu obradu prikupljenih podataka na mapama i obrascima pripremljena je i baza podataka. Radi nedostatka cjelovitog rješenja za ovakav tip mjerenja u smislu mjernog uređaja i softverske podrške, opisan je način povezivanja i korištenja dostupnih uređaja i softverskih rješenja. Vodeći se osnovnim postavkama koje definiraju

GIS, u radu je dan detaljni prikaz aktivnosti koje su razrađene i primijenjene na praktičnom primjeru, uvid u implementaciju GIS-a i razradu nestandardne metode [4] za potrebe prikupljanja podataka vezanih uz područje održavanja cesta. Osim za primjenu na identičnim aktivnostima, rad također daje smjernice za razradu metoda na bilo kojem sličnom radu iz tog područja.

2. Opća podjela i opis radova za prikupljanje podataka katastra zidova i propusta

2.1. Pripremni radovi

Pripremni radovi obuhvaćali su aktivnosti na prikupljanju podloga, odabiru neophodne opreme i obuku. Dostupne geodetske podloge mjerila 1:1000 i 1:5000 su digitalizirane, geokodirane i pripremljene za daljnju obradu u CAD i GIS aplikaciji sa shemom slaganja listova. Izrađene su i podloge temeljem ortofoto, odnosno satelitskih snimaka i pripremljene za daljnju obradu također u CAD i GIS aplikaciji. Prema navedenim podlogama formirani su listovi mjerila 1:2500 koji su se koristili za terensko prikupljanje podataka, odnosno položajni prikaz evidentiranih objekata. Kako bi se utvrdila vjerodostojnost i dostatnost prikupljenih geodetskih podloga bilo je potrebno obići cijelu trasu ceste te je dodatno napravljen inicijalni video zapis trase ceste u oba smjera, a GPS uređajem je određen položaj trase ceste u prostoru. Inicijalno su evidentirani svi objekti za koje će se kasnije provesti detaljno snimanje. Na osnovu te evidencije izrađen je plan i dinamika detaljnog snimanja objekata, definirana je oprema neophodna za snimanje i pripremljeni su obrasci po kojima će se provoditi evidentiranje objekata i omogućiti objektivni prikaz stanja. Na kraju je izrađena i evidencija objekata koji su zatrpani ili obrasli vegetacijom kako bi se organiziralo njihovo čišćenje od strane ŽUC PGŽ i na taj ih se način učinilo dostupnima za detaljno snimanje.

2.2. Terenski radovi

Terenski radovi obuhvaćaju aktivnosti na detaljnom snimanju i pozicioniranju objekata te prikupljanju i evidentiranju podataka neophodnih za izradu elaborata. To je podrazumijevalo organizaciju, opremanje i osposobljavanje (edukaciju) osoba koje će provoditi terenska mjerenja te organizaciju prijevoza osoba i opreme. Nakon toga bilo je potrebno izvršiti detaljno evidentiranje objekata (snimanje, lociranje, fotografiranje, mjerenje gabarita, opis stanja, oštećenja itd.) i pozicioniranje GPS-om. Podaci su se višestruko kontrolirali u smislu njihove dostatnosti i potpunosti.

2.3. Uredska obrada podataka

Uredski dio obuhvaćao je aktivnosti na obradi podataka, izradi elaborata i baze podataka, odnosno kontrolu prikupljenih podataka prema evidenciji objekata, unos podataka u odgovarajuću računalnu bazu podataka, korigiranje inicijalno postavljenih pozicija objekata u CAD i GIS aplikaciji, usklađivanje video i foto dokumentacije s vektorskim podacima i bazom podataka te, konačno, izradu elaborata katastra.

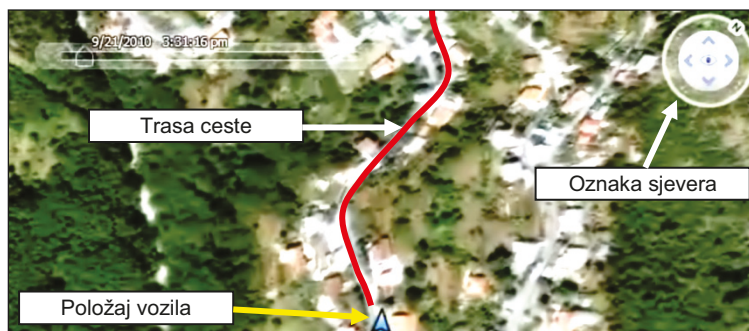
2.4. Oprema za snimanje i evidentiranje postojećeg stanja

Opremu potrebnu za obavljanje posla na prikupljanju podataka može se podijeliti na zaštitnu opremu (zaštitna kaciga, prometni znak, reflektirajući trokut, reflektirajući prsluk i čvrsta obuća), zatim na opremu za snimanje trase i pozicioniranje objekata (GPS uređaj, video kamera za snimanje u visokoj rezoluciji, digitalni fotoaparati) i opremu za detaljno snimanje i evidenciju objekata (formular za opis objekata, laserski mjerač duljina, GPS uređaj, metar, mehanički mjerač duljina, boja u spreju, baterijska lampa i priručna libela).

3. Metodologija izrade geo-označenog video zapisa i inicijalno evidentiranje i pozicioniranje objekata

3.1. Izrada geooznačenog video zapisa

Izrada video zapisa prva je aktivnost koja se provodi nakon odrađenih pripremnih radova. Video snimak koristan je za planiranje strategije za prikupljanje podataka s terena (obzirom da se iz njega može dobiti opći uvid o broju objekata i njihovom položaju), ali i prilikom kasnije obrade podataka u uredu. Poželjno je da video snimak bude u visokoj rezoluciji, pri 30 sličica u sekundi (ili više), što jamči uočavanje bitnih detalja prilikom njegova pregledavanja. Video kameru najpovoljnije je smjestiti na krovni nosač vozila krajnje lijevo, kako bi prilikom vožnje snimala središnji dio ceste. Ukoliko se ne raspolaze s video kamerom koja već ima ugrađen GPS uređaj, potrebno je uz video snimanje istovremeno snimati i rutu vožnje pomoću ručnog GPS uređaja ili cestovne GPS navigacije. Te je podatke kasnije potrebno obraditi i pretvoriti u jedinstveni video zapis. Standardni *.gpx zapis sadrži podatke o zemljopisnoj dužini, širini i nadmorskoj visini, uz pripadajući podatak o vremenu. Besplatni i općeprihvaćeni servis Google Earth podržava navedeni zapis te omogućuje animirani prikaz vožnje na osnovu tog zapisa (Slika 1).



Slika 1. Prikaz rute korištenjem aplikacije Google Earth

Nadalje, kako bismo dobili i kontinuirani animirani prikaz zemljopisne dužine i širine te brzine i stacionaže kako je prikazano na Slici 2, izrađena je jednostavna rutina u programu Qbasic koja je te podatke proračunavala na osnovu izraza (1).

$$6371 \cdot 10^3 \cdot \cos^{-1}(\cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) + \sin(\beta_1) \cdot \sin(\beta_2)) \quad (1)$$

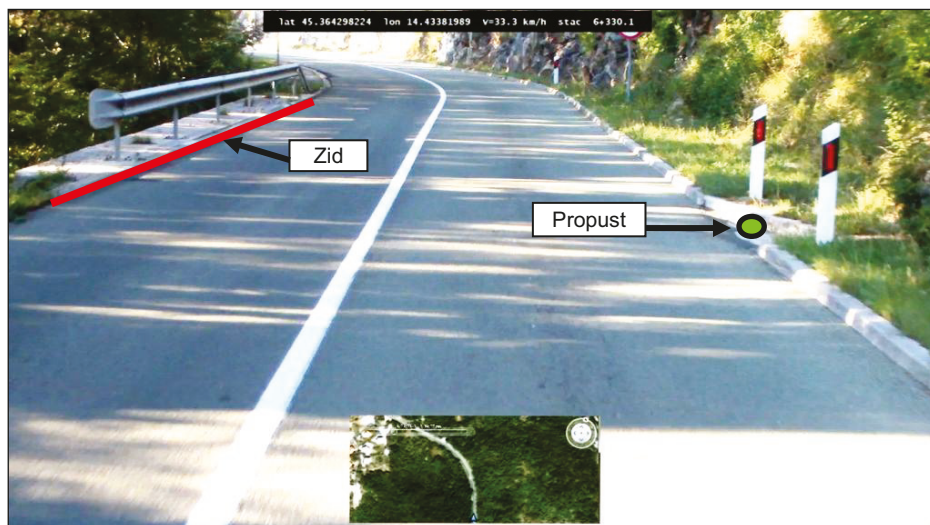
Vrijednost $6371 \cdot 10^3$ predstavlja polumjer kugle (u metrima) kojom je aproksimiran Zemljin geoid, a takva pretpostavka vrijednosti radijusa u ukupnoj duljini ceste daje razliku od oko 20 m (0,08%) u odnosu na podatke s GPS uređaja, odnosno podatke o duljini ceste Županijske uprave za ceste PGŽ. Kut α predstavlja zemljopisnu dužinu, a kut β širinu.

lat 45.341744900 lon 14.46490657 v=33.8 km/h stac 0+ 81.8

*Slika 2. Prikaz podataka vizualiziranih programiranjem u programskom jeziku Qbasic na temelju *.gpx zapisa*

Obzirom da i jedan i drugi prethodno navedeni animirani prikaz *.gpx zapisa nastaju iz istoga izvora, međusobno su vremenski usklađeni te ih je u konačnici moguće uskladiti i s video zapisom trase ceste. Usklađivanje, obrada i konačna jedinstvena izlazna datoteka video zapisa može se izvršiti s nekim od softvera za obradu video materijala. Prikaz tako složenog video zapisa dan je na Slici 3 na kojoj se animirani prikaz lokacije na karti nalazi na dnu, a animirani tekstualni podaci o položaju i brzini kretanja na vrhu ekrana. Na slici su označeni po jedan propust i zid za koje će se kasnije u ovom radu dati i prikazi u CAD i GIS sučelju. Tako formirani video zapis omogućuje nam da za bilo koji objekt znamo njegov točan položaj u prostoru te ga vrlo lako možemo

pronaći za potrebe kasnijeg detaljnog mjerenja, a konačno i prilikom održavanja ceste upravo za lociranje i pronalaženje objekta kojeg je potrebno sanirati.



Slika 3. Integralni prikaz video snimka trase ceste, položaja na karti i tekstualnih podataka o položaju na cesti

3.2. Inicijalno evidentiranje i označavanje objekata

U ovoj fazi potrebno je detaljno istražiti trasu, evidentirati sve objekte i izvršiti njihovo pozicioniranje na kartama. Za potrebe izrade elaborata katastra napravljena je rasterska podjela cijele trase ceste na listove mjerila 1:2500. Listovi su šifrirani stupcima (A do U) i retcima (1 – 30) kako je prikazano na Slici 4 (slika se odnosi na cestu Ž5064, međutim, jednak ključ rasporeda karata korišten je i za cestu Ž5017). Za bolje snalaženje na lokaciji opažanja postoje i topografski i ortofoto listovi iste podjele i istih oznaka. Cesta je kategorizirana odgovarajućom oznakom (Ž5064 odnosno Ž5017 – županijska cesta) i podijeljena je na linkove. Duž trase ceste nalaze se kilometarski stupići na kojima je upisana šifra ceste, link i udaljenost od početka linka. Karte s navedenom podjelom poželjno je na terenu istovremeno imati i u tiskanom obliku i učitanu u računalu (ručni PC, laptop ili tablet). Prema tome, u trenutku evidentiranja, podaci se istovremeno zapisuju na kartama ručno i na računalu. Razlozi za dvostruko vođenje podataka su prije svega sigurnosni (mogućnost pražnjenja baterije na računalu, oštećenje uređaja prilikom rada na cesti, gubitak podataka zbog neopreznosti i sl.). Određivanje pozicije objekta i njegov unos na kartu vrši se tako da se locira na kartama, a zatim provjeri trenutnom GPS

lokacijom. Ukoliko je to moguće, položaj se dodatno treba odrediti i relativno u odnosu na pozicije drugih objekata ucrtanih na kartama (kuće, bočni privozi, trase vodovoda, dalekovoda i sl.). Zidovi se označavaju linijom i oznakom Z nakon koje slijedi broj, a propusti točkom i oznakom P nakon koje slijedi broj. Bojom u spreju potrebno je istovjetnu oznaku napisati i na samoj cesti kraj objekta kako bi prilikom detaljnog snimanja i određivanja karakteristika objekta, što dolazi u slijedećoj fazi, bilo lakše odrediti njegov položaj.



Slika 4. Rasterska podjela trase ceste Ž5064 na listove

Nakon unosa svih objekata na karte, iz GIS sučelja podaci su izvezeni u CAD sučelje kako bi se uredili u tehničkom smislu, odnosno prikazali u obliku situacije osi ceste s ucrtanim objektima i njihovim stacionažama (Slika 5). Nakon pripreme i uređivanja podataka na taj način, karte se ponovo tiskaju

po prethodno navedenom ključu i koriste, osim kao dio elaborata, za ponovne izlaske na teren.



Slika 5. Prikaz objekata na trasi ceste nakon obrade i izvoza podataka iz GIS alata u CAD alat

4. Metodologija prikupljanja podataka s terena

Za prikupljanje, evidenciju i unos podataka o propustima i zidovima pripremljeni su obrasci koji će u ovom radu biti prikazani i opisani u segmentima.

4.1. Opći dio

Prvi podatak koji se upisuje u obrazac je odgovarajući link, uz šifru podloge i lokaciju (toponim s geodetske podloge).

Svako opažanje na objektima na trasi ceste vrše tri osobe u timu sa zaduženjima za vođenje zapisnika, mjerenje dimenzija objekata, fotografiranje

i ispomoć pri mjerenju. Nadalje, u obrazac se upisuje *šifra objekta*, *vrijeme opažanja* (datum, sat, vrijeme) i *članovi tima za opažanje*. *Šifra objekta* je oznaka (slova i brojke) koja mora biti upisana na obrascu, geodetskoj podlozi i biti prefiks u nazivu fotografije istog objekta, čime predstavlja vezu između ta tri podatka. Pod opaskom *vrijeme* podrazumijeva se opis vremenskih prilika (sunčano, vedro, oblačno, vjetar, temperatura). Članovi tima za opažanje u obrazac upisuju svoja imena i potpisom potvrđuju unesene podatke.

Tablica 1. Opći dio obrasca za terensko prikupljanje podataka

CESTA: <u>Ž 5064</u>	LINK: _____	ŠIFRA PODLOGE: _____	LOKACIJA: _____
VRIJEME OPAŽANJA:		ŠIFRA OBJEKTA: _____	
Datum: _____		TIM ZA OPAŽANJA (ime i prezime, potpis):	
Sat: _____		Zapisnik (1): _____	
Vrijeme: _____		Mjerenja (2): _____	
		Foto (3): _____	

4.2. Snimak zidova

Za potrebe izrade katastra, zidom se smatra svaka građevina/objekt kojoj je funkcija stabilnost i zaštita trupa prometnice i kolnika. Prema namjeni razlikujemo: potporne, obložne i zaštitne građevine, ali i objekte koji imaju višestruku funkciju (npr. potpornoobložni). Prema vrsti materijala od kojih su izvedeni razlikujemo:

- zidove od klesanog kamena bez veziva;
- zidove od zidanog kamena s betonskim vezivom;
- zidove s oblogom od lomljenog kamena;
- zidove od betona;
- armirano betonske konstrukcije;
- zidove od gabiona.

Osim klasičnih zidova, za katastar je potrebno evidentirati i građevine kojima se stabilizira pokos zasjeka ili nasipa, pa tako razlikujemo:

- konstrukcije za zaštitu i stabilizaciju pokosa usjeka (mlazni beton, mlazni beton s mrežom, sidra, roštiljne AB konstrukcije i sl);
- pokos nasipa obložen lomljenim kamenom (ako je nagib pokosa strmiji od 1:1);
- konstrukcije kojima se vrši stabilizacija pokosa nasipa obloženih lomljenim kamenom u vidu betonske obloge, temeljnih traka u nožici nasipa, rebrastih ili roštiljnih konstrukcija izvedenih na pokosu nasipa.

Ogradni zidovi u blizini trupa ceste (ili uz sami kolnik u naselju), ukoliko nemaju funkciju nosivosti ili stabilizacije pokosa, odnosno ako nisu dio trupa ceste, ne smatraju se zidovima koji se evidentiraju ovim katastrom.

4.2.1. Situacioni položaj ceste i zida

Karakteristike ceste na lokaciji propusta definiraju se *širinom kolnika, uzdužnim i poprečnim nagibom* kolnika na lokaciji početka (A) i završetka (B) zida. Širina kolnika obuhvaća vozne trake, rubne trake (bez rigola i pasica) i ostale kolne površine približno okomito na os ceste. Nagib kolnika se procjenjuje ili mjeri priručnom libelom. Uzdužni nagib je pozitivan ako se apsolutna kota asfalta povećava (raste) u smjeru rasta stacionaže. *Poprečni nagib* kolnika je pozitivan ako je desni rub kolnika viši od lijevog ruba kolnika u smjeru rasta stacionaže. *Udaljenost od ruba kolnika* se evidentira na početku (A) i završetku (B) zida. Položaj trase određuje se zaokruživanjem odgovarajućeg opisa zavojitosti trase. U rubriku *napomena* upisuje se broj fotografija (šifra) i ostale posebnosti ove lokacije.

Tablica 2. Situacioni položaj ceste i zida

SITUACIONI POLOŽAJ CESTE I ZIDA:		Upisati vrijednosti:	
		Početak zida (A)	Završetak zida (B)
		Stacionaža: _____	_____
		Širina kolnika [m]: _____	_____
		Uzdužni nagib [%]: _____	_____
		Poprečni nagib [%]: _____	_____
		Udaljenost od ruba koln. [m]: _____	_____
NAPOMENA: _____		Zaokruži odgovarajuće opažanje: Položaj trase: lijevi zavoj pravac desni zavoj	

4.2.2. Položaj ceste i zida u poprečnom presjeku

Položaj ceste i zida u poprečnom presjeku definira odnos trupa ceste, zida i terena. Podaci se opažaju i unose posebno za lijevu i desnu stranu ceste prema skicama u obrascu i to na početku i na završetku zida. *Položaj trupa ceste [A), B), C) ili D)]* definira cestu u nasipu ili usjeku (zasjeku) i odgovarajući nagib terena koji definira smjer tečenja površinskih oborinskih voda.

Za podatke o konstrukciji, materijalu zida i procjednicama potrebno je zaokružiti odgovarajući opis. Ova evidencija koristit će se za klasificiranje oštećenja i ocjenu potrebe za detaljnim snimanjem stanja zida.

4.2.4. Oprema na zidu

Opažanje obuhvaća evidenciju eventualne cestovne opreme na zidu. Pod *ostalo* se primjerice može evidentirati parapetne zaštitne zidove na kruni potpornog zida, kolobrane ili reklame.

Tablica 5. Oprema na zidu

OPREMA NA ZIDU:	Odbojnik	Znak	Ograda	Ostalo:
NAPOMENA:				

4.3. Snimak cestovnog propusta

Cestovnim propustom smatra se svaki poprečni otvor u trupu ceste kojim je omogućeno protjecanje vode. Objekt se može uočiti na osnovu geodetske podloge (samo značajniji odnosno veći propusti), zatim prateći pad objekata površinske odvodnje (rigoli, cestovni rubnjaci, obodni jarci) na planumu ceste u smjeru tečenja vode i opažanja načina ispuštanja vode u teren ili direktno u objekt propusta, I, konačno, uočavanjem depresija terena na trasi (uvale, drage) gdje je trup ceste u nasipu, a koje najčešće imaju povremene bujične tokove.

4.3.1. Situacioni položaj ceste i propusta

Nailaskom na objekt propusta definira se njegov položaj na geodetskoj podlozi i na prijenosnom računalu u odgovarajućem softveru i upisuje *stacionaža* na odgovarajućem linku ceste.

Tablica 6. Situacioni položaj ceste i propusta

SITUACIONI POLOŽAJ CESTE I PROPUSTA:		<i>Upisati vrijednosti:</i>	
		Stacionaža: _____	
		Širina kolnika: _____	m
		Uzdužni nagib: _____	%
		Poprečni nagib: _____	%
		Položaj propusta α: _____	°
		<i>Zaokruži odgovarajuće opažanje:</i>	
		(A) Uljev propusta: DA NE	
		(B) Izljev propusta: DA NE	
		položaj trase: lijevi zavo pravac desni zavo	
NAPOMENA:			

Karakteristike ceste na lokaciji propusta definiraju se *širinom kolnika* te *uzdužnim i poprečnim nagibom* kolnika. Širina kolnika obuhvaća vozne i rubne trake (bez rigola i pasica) – približno okomito na os ceste. Nagib kolnika se procjenjuje ili mjeri priručnom libelom. Uzdužni nagib je pozitivan ako se apsolutna kota asfalta povećava (raste) u smjeru rasta stacionaže. Poprečni pad kolnika je pozitivan ako je desni rub kolnika viši od lijevog u smjeru rasta stacionaže. Potrebno je izmjeriti položaj propusta u odnosu na os ceste, odnosno kut α . Smjer tečenja vode kroz propust određuje se položajem uljeva odnosno izljeva u točkama A i B. Položaj trase određuje se zaokruživanjem odgovarajućeg opisa zavojitosti trase. U rubriku *napomena* upisuje se broj fotografija (šifra) i ostale posebnosti ove lokacije.

4.3.2. Položaj ceste i propusta u poprečnom presjeku

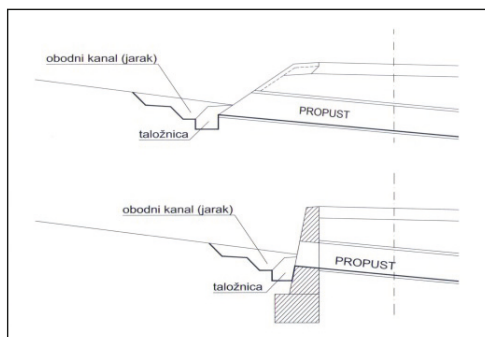
Položaj ceste u poprečnom presjeku definira odnos trupa ceste, propusta i terena. Podaci se opažaju i unose posebno za lijevu, a posebno za desnu stranu ceste prema skicama u obrascu. *Položaj trupa ceste [A), B), C) ili D)]* definira cestu u nasipu ili usjeku (zasjeku) i odgovarajući nagib terena koji definira smjer tečenja površinskih oborinskih voda. *Nagib terena* je podatak koji se procjenjuje. *Obodni jarak i rigol* definiraju se odgovorima *da* ili *ne* (postoje ili ne), a u rubrici *napomena* upisuju se približne dimenzije jarka (dubina/širina) i dokumentiraju fotografijom. *Vrsta pokosa* definira se šifrom [1), 2), 3) 4), 5) ili 6)] za nasip, odnosno usjek prema opisu iz obrasca. Ako je vrsta pokosa ocijenjena kao *ostalo*, tada se u rubrici *napomena* opisuje vrsta pokosa i dokumentira fotografijom. *Nagib pokosa* je podatak koji se procjenjuje. *Rigol* se evidentira odgovorima *da* ili *ne*. *Visina pokosa* upisuje se po procjeni razlike visine ruba kolnika i vrha usjeka / nožice nasipa. Fotografije se odnose na prikaz pokosa trupa ceste u području propusta.

Tablica 7. Položaj ceste i propusta u poprečnom presjeku

POLOŽAJ CESTE I PROPUSTA U POPREČNOM PRESJEKU:		LIJEVO	DESNO
<p>A) Cesta u nasipu</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Pokos nasipa 2) Kamena obloga (rolirung) 3) Poltorni zid (čidani kamen) 4) Poltorni zid (betonski) 5) Zid od gabiona 6) Ostalo 			
<p>Cesta u usjeku</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Pokos iskopa 2) Obložni zid (komljeni kamen) 3) Poltorni zid (beton) 4) Zid od gabiona 5) Ostalo 			
NAPOMENA:			
		Položaj trupa ceste A), B), C) ili D)	
		Nagib terena 1 : n (procjena)	
		Obodni jarak DA ili NE	
		Vrsta pokosa 1), 2), 3), 4), 5) ili 6)	
		Nagib pokosa n : 1 (procjena)	
		Rigol DA ili NE	
		Visina pokosa	

4.3.3. Uljev propusta

Potrebno je definirati dva osnovna tipa uljeva u propust prema čemu će se u obrazac upisivati odgovarajući podaci za okno ili za obodni jarak. Kod prvog tipa uljev u propust je iz obodnog kanala - uljevna strana propusta nalazi se na pokosu nasipa ili u licu potporne građevine (Slika 6).



Slika 6. Uljev u propust iz obodnog kanala

Drugi tip podrazumijeva uljev u propust iz okna - uljevna strana propusta nalazi se uz rub kolnika odnosno uz rigol s pripadajućim otvorom i poklopcem ili izvan kolnika kao dio obodnog kanala (Slika 7).



Slika 7. Uljev u propust iz okna

Kota uljeva: podatak koji označava visinsku razliku između dna cijevi na uljevu i kote ruba kolnika. *Okno* se opisuje dimenzijama svijetlog otvora (dužina, širina, visina), taložnica se evidentira upisom njene dubine, a poklopac vrstom materijala. Ponekad se uljev u okno propusta izvodi preko slivničke rešetke što je također potrebno evidentirati. Poklopac okna evidentira se vrstom materijala od kojeg je izveden (lijevano-željezni, betonski, od čeličnog lima itd.). Za *Obodni jarak:* evidentiraju se dimenzije: širine dna d , visina h , materijal obloge (beton, lomljeni kamen, opločnici i sl.) i dimenzije taložnice

(dužina, širina, visina). U rubriku *napomena* upisuje se broj fotografija (šifra) i ostale posebnosti ove lokacije. Fotografije se odnose na prikaz uljeva u propust.

Tablica 8. *Uljev propusta*

ULJEV PROPUSTA				
Kota uljeva:				
OKNO	DIMENZIJE (l/d/h)	TALOŽNICA (dubina)	SLIVNIK (da/ne)	POKLOPAC (materijal)
OBODNI JARAK	DIMENZIJE JARKA (d/h)	OBLOGA JARKA (materijal)	TALOŽNICA (l/d/h)	
NAPOMENA:				

4.3.4. Cijev propusta

Cijev propusta evidentira se *dimenzijama* i *materijalom izvedbe* u odgovarajućoj rubrici prema vrsti otvora propusta (cijevni – \emptyset , pravokutni – d (širina) / h (visina) ili svodni – d (širina) / h (visina) / s (strelica luka). U rubriku *napomena* upisuje se broj fotografija (šifra) i ostale posebnosti cijevi propusta te, posebice, uočena oštećenja cijevi propusta.

Tablica 9. *Cijev propusta*

CIJEV PROPUSTA				
Otvor propusta	Cijevni [\emptyset]	Pravokutni [d/h]	Svodni [d/h/s]	Materijal
Dimenzije otvora				
NAPOMENA:				

4.3.5. Izljev propusta

Kota izljeva je podatak koji označava visinsku razliku između dna cijevi na izljevu i kote ruba kolnika. Izljev propusta trebao bi u početku biti uređen minimalno tajačom, a u nastavku odvodnim jarkom, ili je izljev izveden kao kaskada. Tajača se evidentira tlocrtnim dimenzijama; širinom l i dužinom d. *Obodni jarak* evidentira se dimenzijama i materijalom obloge jarka (beton, lomljeni kamen, opločnici itd.). Kaskada se evidentira upisom njene visine. U rubriku *napomena* upisuje se broj fotografija (šifra) i ostale posebnosti izljeva propusta (npr. izljev propusta u potpornom zidu ili betonska glava propusta). Eventualna oštećenja propusta se opisuju i fotografiraju.

Tablica 10. Izljev propusta

IZLJEV PROPUSTA				
Kota izljeva:				
OBODNI JARAK	DIMENZIJE JARKA (d/h)	OBLOGA JARKA (materijal)	TAJAČA (l/d)	KASKADA (h)
NAPOMENA:				

5. Uredski dio obrade podataka

Podatke o pojedinim objektima koji su upisani u obrasce potrebno je upisati u GIS bazu podataka, koja je strukturirana sukladno atributima kojima se pojedini objekti upisaju u obrasce. Shema hijerarhije međuodnosa objekta ceste i podobjekata zidova i propusta prikazana je na Slici 8.



Slika 8. Shema hijerarhije međuodnosa objekta ceste i podobjekata zidova i propusta

Pri izradi katastra korišten je *ESRI Shapefile* koji je jedan od najstarijih i širokoprihvaćenih formata vektorskih podataka. Takav format pokazao se dostatnim za potrebe izrade elaborata. Sam „shapefile“ [5] zapravo je skup dokumenata sa *.shp, *.shx, *.dbf nastavcima, čime nam je omogućeno jednostavno opisivanje primitivnih geometrijskih objekata/oblika – točaka (propusti), linija (zidovi) i poligona (nije korišteno u ovom radu) te pridruživanje opisnih atributa objekata poput imena, stacionaže i sl., odnosno svih podataka koji se nalaze upisani u obrascima. Popis važnijih atributa zidova i propusta dan je u Tablicama 11 i 12.

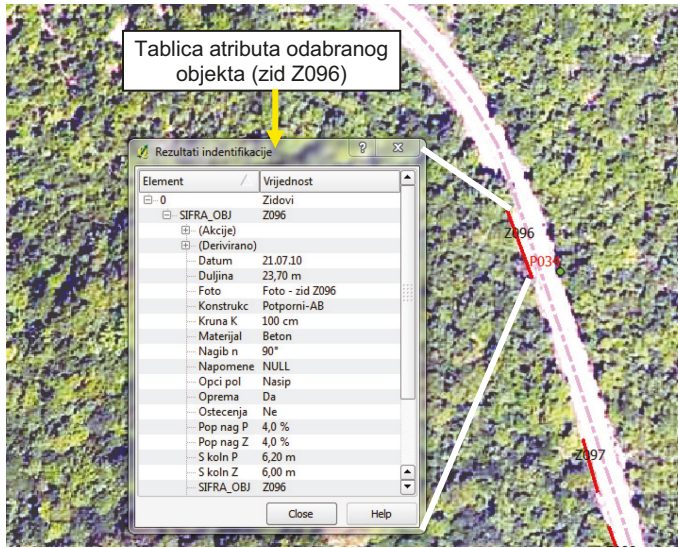
Tablica 11. Popis važnijih atributa zidova

id	naziv	tip	OPIS
0	SIFRA_OBJ	string	Šifra objekta (Zxxx)
1	Datum	string	Datum snimanja i mjerenja
2	Stacionaza	string	Stacionaža od početne točke [m]
3	Duljina	string	Duljina zida [m]
4	Opci pol	string	Usjek/nasip/zasjek
5	Kruna K	string	Širina krune zida [cm]
6	Visina H	string	Najveća visina zida [m]
7	Nagib n	string	Nagib zida 1:n ili [°]
8	Konstrukc	string	Tip konstrukcije zida
9	Materijal	string	Materijal zida
10	Ostecenja	string	Postoje li oštećenja i koja
11	Oprema	string	Postoji li oprema i koja
12	Foto	string	Ime fotografije
13	Napomene	string	Opće napomene ukoliko postoje

Tablica 12. Popis važnijih atributa propusta

id	naziv	tip	OPIS
0	SIFRA_OBJ	string	Šifra objekta (Pxxx)
1	Datum	string	Datum snimanja i mjerenja
2	Stacionaza	string	Stacionaža od početne točke u metrima
3	Sir koln	string	Širina kolnika u metrima
4	Pop nagib	string	Poprečni nagib kolnika [%]
5	Kut alfa	string	Kut propusta u odnosu na os ceste [°]
6	Uljev L	string	Uljev s lijeve ili desne strane [Da/Ne]
7	Kota uljev	string	Kota uljeva [m]
8	Okno	string	Postoji li okno ili ne
9	Otvor prop	string	Tip otvora propusta
10	Dim otvora	string	Dimenzija otvora propusta
11	Kota izlj	string	Kota izljeva [m]
12	Foto	string	Ime fotografije
13	Napomene	string	Opće napomene ukoliko postoje

Upisivanjem podataka (koje nalazimo u ispunjenim obrascima s detaljnog terenskog snimanja) u za to predviđena polja, dodjeljujemo vektorskim podacima zidova i propusta attribute i time dobivamo tablicu podataka u kojoj su geometrijski podaci i atributi za svaki objekt povezani i možemo ih pretraživati po raznim kriterijima. Za potrebe katastra tako su kreirane dvije tablice; jedna koja se odnosi na zidove (Tablica 13) i druga koja se odnosi na propuste (Tablica 14). Podaci koji se nalaze u skupnoj tablici atributa mogu se pojedinačno prikazivati izravnim odabirom željenog objekta, zida ili propusta, kako je prikazano na Slici 9.



Slika 9. Prikaz vektorskih i atributnih podataka na rasterskoj podlozi

Tablica 13. Prikaz dijela baze podataka zidova na Ž5017

	SIFRA_OBJ	Datum	Stacionaza	Duljina	S koln P	S koln Z	Uzd nag P	Uzd nag Z
0	Z001	19.07.10	302 m	41,50 m	5,80 m	5,80 m	3,0 %	3,0 %
1	Z002	19.07.10	791 m	47,00 m	7,00 m	7,00 m	4,0 %	4,0 %
2	Z003	20.07.10	5936 m	19,00 m	6,10 m	6,10 m	5,0 %	5,0 %
3	Z004	20.07.10	6054 m	20,00 m	7,00 m	7,00 m	4,0 %	4,0 %
4	Z005	20.07.10	6277 m	79,00 m	6,50 m	6,50 m	5,0 %	4,0 %
5	Z006	20.07.10	6300 m	7,50 m	6,50 m	7,50 m	7,0 %	6,0 %
6	Z007	20.07.10	6310 m	5,30 m	7,50 m	6,80 m	6,0 %	5,0 %
7	Z009	20.07.10	6350 m	31,60 m	6,80 m	7,00 m	-1,0 %	-4,0 %
8	Z008	20.07.10	6321 m	21,30 m	6,80 m	6,80 m	5,0 %	4,0 %
9	Z010	20.07.10	6902 m	35,50 m	6,50 m	6,50 m	-3,0 %	-4,0 %
10	Z011	20.07.10	7162 m	52,50 m	7,00 m	7,00 m	-6,0 %	-7,0 %
11	Z012	20.07.10	7260 m	20,00 m	7,00 m	7,00 m	-7,0 %	-5,0 %
12	Z013	20.07.10	8952 m	30,30 m	6,10 m	7,00 m	2,5 %	4,5 %
13	Z014	20.07.10	9051 m	21,50 m	9,10 m	9,10 m	-1,5 %	-1,5 %
14	Z015	20.07.10	9131 m	39,50 m	7,40 m	7,00 m	-2,5 %	-3,0 %
15	Z016	20.07.10	9235 m	39,30 m	6,60 m	6,60 m	-6,0 %	-6,0 %
16	Z017	20.07.10	9382 m	31,00 m	6,00 m	6,00 m	-2,5 %	-2,5 %
17	Z018	20.07.10	10241 m	81,50 m	6,10 m	6,50 m	-2,5 %	3,5 %
18	Z019	20.07.10	10393 m	44,50 m	6,00 m	6,00 m	-7,0 %	-3,0 %
19	Z020	20.07.10	11934 m	26,50 m	6,40 m	6,30 m	-4,0 %	-1,0 %

Tablica 14. Prikaz dijela baze podataka propusta na Ž5017

	SIFRA_OBJ	Datum	Stacionaza	Sir koln	Uzd nagib	Pop nagib	Kut alfa	Uljev L
0	P001	19.07.10	944 m	7,0 m	6,0 %	-3,0 %	60°	DA
1	P002	19.07.10	1471 m	6,0 m	0,0 %	0,0 %	90°	DA
2	P003	19.07.10	1682 m	5,6 m	0,0 %	0,0 %	90°	DA
3	P004	19.07.10	2526 m	11,7 m	-5,0 %	3,0 %	75°	NE
4	P005	19.07.10	3455 m	6,5 m	2,0 %	3,0 %	90°	DA
5	P006	19.07.10	3624 m	6,5 m	-2,0 %	2,0 %	90°	DA
6	P007	19.07.10	4017 m	6,2 m	4,0 %	0,0 %	90°	NE
7	P008	19.07.10	4301 m	6,5 m	1,0 %	-3,0 %	90°	DA
8	P009	19.07.10	4397 m	6,5 m	3,0 %	4,0 %	90°	DA
9	P010	19.07.10	4483 m	6,2 m	2,0 %	3,0 %	90°	DA
10	P011	19.07.10	4985 m	6,6 m	-2,0 %	2,0 %	90°	DA
11	P012	19.07.10	5178 m	6,4 m	-1,5 %	-1,0 %	90°	NE
12	P013	19.07.10	5288 m	6,2 m	1,0 %	0,0 %	90°	NE
13	P014	20.07.10	7899 m	6,5 m	-4,0 %	-3,0 %	90°	NE
14	P015	20.07.10	8045 m	6,5 m	0,0 %	-2,5 %	90°	NE
15	P016	20.07.10	8514 m	6,3 m	2,0 %	2,0 %	90°	NE
16	P017	20.07.10	8924 m	6,0 m	2,5 %	-1,0 %	90°	DA
17	P018	20.07.10	9066 m	9,1 m	-1,5 %	-2,0 %	90°	DA
18	P019	20.07.10	9331 m	6,2 m	-1,5 %	0,0 %	90°	DA
19	P020	20.07.10	9985 m	6,1 m	-2,0 %	-1,0 %	90°	DA

Korištenje GIS alata omogućava jednostavnu manipulaciju podacima i brzo pronalaženje objekata na kartama. Za svaki objekt na karti jednostavno se očitavaju podaci, što omogućava analizu uzoraka pojedinih pojava (npr. izgradnjom ceste skrenut je bujični tok koji uzrokuje začepljenje drenaže na propustima. Prema tome može se lako zaključiti u kojim područjima postoji, primjerice, problem s odvodnjom. Prostorni podaci tako imaju određene karakteristike koje su opisane izrazima: oblik, smještaj i odnos prema drugim prostornim podacima (geometrija, položaj i topologija) [4].

6. Zaključak

U radu je dan pregled aktivnosti na izradi katastra zidova i propusta. GIS alat pritom je poslužio kao sredstvo za unos i pregled postojećeg stanja prvenstveno u svrhu izbjegavanja dugotrajnog pretraživanja tiskane verzije elaborata, tehničkog opisa i obrazaca. Naime, prilikom takvog pregledavanja nekoliko stotina objekata, tiskana verzija nije praktična. Jednostavna baza podataka koja je pritom formirana mogla bi poslužiti i u svrhu pregleda aktivnosti održavanja objekata ukoliko bi je se nadogradilo. Nadogradnja bi bila moguća primjerice u vidu dodavanja još jednog točkastog vektorskog sloja pod nazivom "Održavanje" s atributima: šifra objekta (isti naziv kao i u tablici svojstava objekta), nadnevak, vrsta održavanja i trenutno stanje objekta. Podatak bi se ucrtao na poziciju evidentiranog objekta čime bi vizualno bilo uočljivo koji se objekt održava, a u atributnim tablicama poveznica bi bila istoimena šifra objekta. Ukoliko bi se provodio redoviti monitoring stanja

evidentiranih objekata i izvršavao redovit unos u GIS-u, bilo bi moguće voditi evidenciju o stanju objekata po datumu ili stanju kao ključu pretrage, čime bi se dobio svojevrsni histogram promjene.

Aktivnosti na izradi katastra provedene su prije svega koristeći se pristupačnom opremom i softverom [6]. Naime, u nedostatku sofisticirane opreme u vidu specijalnih kamera, GPS uređaja, naprednih radnih stanica i, konačno, specijaliziranog softvera, metodologija je razvijena na jednostavnijim resursima. Uzastopni pokušaji u traženju najpovoljnijeg redoslijeda prikupljanja i obrade podataka prilikom izrade katastra na Ž5064 (2009. god.) [1] dali su kvalitetniji uvid u pristup radu te je izrada katastra za Ž5017 (2010. god.) [2] bila gotovo dvostruko brža. Dio vezan uz izradu video snimka koji povezuje zemljopisni položaj i brzinu, uz integralni prikaz na istom ekranu, pokazao se najzahtjevnijim dijelom obrade podataka. Naime, bili su potrebni uzastopni pokušaji snimanja i usklađivanja video snimaka pomoću različitih tipova kamera (od web kamera do HD kamera), pri različitim vremenskim uvjetima, različitim brzinama vožnje i pozicijama kamere na vozilu, različitim rezolucijama i brojem sličica u sekundi. Jedna od prvih varijanti obrade videa prikazana je na Slici 10, gdje je video snimak trase ceste nadopunjen stacionažom prikazanom u donjem lijevom uglu (prikaz je dobiven nakon obrade i integriranja dva odvojena video snimka). Taj snimak trase ceste dobiven je web kamerom rezolucije 640x480 piksela pri 30 sličica u sekundi, a stacionaže su simulirane drugom web kamerom rezolucije 320x240 piksela pri 15 sličica u sekundi koja je snimala instrument ploču vozila. Kvaliteta video snimka, iako dostatna za potrebe ovog elaborata, nametala je iznalaženje boljeg rješenja. Također, metoda prethodno navedenog dobivanja vrijednosti stacionaža nije se mogla smatrati konačnom zbog nedovoljne preciznosti. Ipak, takav prvi korak u obradi dao je dobre smjernice za buduća poboljšanja koja su odmah potom i provedena u vidu korištenja HD kamera te određivanja stacionaža pomoću GPS uređaja, što je navedeno u 2. poglavlju ovog rada. Prethodno testiranje snimanja web kamerama bilo je korisno zbog relativno brze softverske obrade video zapisa (male rezolucije i veličine datotečnog zapisa) i pristupačne cijene uređaja.

Metoda dobivanja video zapisa opisana u 2. poglavlju također se može smatrati dobrim polazištem za istraživanje novih mogućnosti u vidu postizanja bolje kvalitete video snimka.



Slika 10. Jedna od varijanti obrade video snimaka niske rezolucije na Ž5064

Obzirom da postoje kamere s ugrađenim GPS lokatorom koje istovremeno uz video zapis snimaju i zapis rute, to predstavlja korak manje u obradi podataka, tim više što proizvođači takvih tipova kamera nude i softverska rješenja koja već imaju integrirani prikaz video snimka s mapom i uzdužnim profilom rute s označenim položajem vozila, uz prikaz brzine kretanja. Značajan razvoj takve vrste kamere i softvera namijenjenih širem tržištu događa se upravo posljednje dvije do tri godine, dijelom vezano i uz ekspanziju online javnog dijeljenja video sadržaja na servisima kao što su Youtube, Vimeo i sl. Korak dalje u napretku kamere predstavlja i revolucionarni koncept istovremenog snimanja video zapisa u svim smjerovima uz pripadajući softver koji omogućava pregledavanje takvog sadržaja. Takvo snimanje omogućuje kamere prikazane na Slici 11 koja na svojem sfernom kućištu sadrži 12 leća te u konačnici daje integralni snimak od 100 megapiksela, odnosno tri megapiksela na trenutnom prikazu ekrana. Kamera je poznata i po nazivu „Google Camera” (iako Google nije niti autor ni proizvođač) jer je ta tvrtka trenutno u velikoj mjeri koristi za svoju uslugu „Street View”. Mogućnosti koje se pružaju pojavom ovakvog tipa kamere uz softver koji bi trebalo prilagoditi specifičnim potrebama kakve su navedene u ovom radu idu u smjeru evolucije standardnog GIS alata zasnovanog na rasterskim podlogama te dodavanju atributa vektorskim podacima ucrtanim na njima. Za potrebe monitoringa stanja na određenoj cesti, mogućnost pregledavanja video snimka iz kojeg bi se direktno mogli očitati atributni podaci o odabranom objektu sa samog video snimka, uz istovremeni prikaz na mapi, autori ovog rada smatraju da predstavlja idući korak u razvoju GIS alata.



Slika 11. Kamera IMC Dodeca 2360 poznata i kao "Googlecam"

Pritom bi i prikupljanje podataka putem opisanih obrazaca koje je trenutno neizbježni dio terenskog rada, napretkom tablet računala moglo doživjeti evoluciju. Naime, obzirom da su zasnovana na mobilnim platformama nove generacije kao što su Apple OS X, Windows Mobile 7 te sve popularniji Android, tek se očekuje razvoj GIS aplikacija [5] [6] predviđenih za rad na njima. Dulja autonomija rada na bateriji (više od 10h), veći ekrani i rezolucije, ali i pristupačnija cijena omogućili bi praktičniji direktan unos podataka u računalo (u odnosu na uređaje koji se sada samo djelomično koriste u te svrhe) već na terenu te time eliminirali potrebu za prepisivanjem podataka s obrazaca na računalo, što se za sada još uvijek smatra uredskim dijelom posla.

7. Literatura

- [1] Sergije Babić i suradnici. Elaborat - Katastar zidova i propusta na županijskoj cesti broj 5064. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2009.
- [2] Sergije Babić i suradnici. Elaborat - Katastar zidova i propusta na županijskoj cesti broj 5017. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2010.
- [3] P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, D. W. Rhind. Geographical Information Systems and Science. John Wiley & Sons, Ltd, England, 2005.
- [4] George B. Korte. The GIS Book. Onword Press, Canada, 2001.
- [5] <http://www.esri.com>; 2010
- [6] <http://www.qgis.org>; 2010

UTJECAJ PROJEKTNIH ELEMENATA NA PROMETNU USLUŽNOST KRUŽNIH RASKRIŽJA

IMPACT OF DESIGN ELEMENTS ON ROUNDABOUT LEVEL OF SERVICE

Sanja Šurdonja, Aleksandra Deluka-Tibljaš, Sergije Babić

***Sažetak.** Primjena kružnih raskrižja u gradovima nalazi svoju opravdanost na mjestima smanjene sigurnosti u odvijanju prometa (neprimjerene brzine, veći broj težih prometnih nezgoda...) ili na mjestima nezadovoljavajuće protočnosti prometa. Opravdanost primjene ovoga tipa raskrižja na mjestu klasičnih trokrakih ili četverokrakih raskrižja uvjetovana je prometnom opravdanošću koja uključuje niz kriterija: prometne kriterije, prostorne kriterije, sigurnosne kriterije, kriterije propusne moći i dr.*

Prostorni uvjeti u gradu predstavljaju limitirajući faktor pri optimiranju tipa raskrižja, odnosno odabiru veličine vanjskog radijusa koji osigurava uvjete protočnosti. Obzirom na navedeno, postavlja se pitanje utjecaja vanjskog radijusa kružnog raskrižja na njegovu propusnu moć. U radu su analizirani standardi pojedinih zemalja (Austrija, Engleska, Australija) za definiranje zahtjeva za geometrijskim elementima kružnih raskrižja te utjecaj primjene različitih vanjskih promjera na razinu uslužnosti ovoga tipa raskrižja. Analiza temeljena na austrijskoj metodi pokazala je da povećanje radijusa ne uvjetuje bitno povećanje kapaciteta kružnoga raskrižja. Pokazalo se da veći utjecaj na kapacitet ima oblikovanje ulaza i izlaza kružnog raskrižja, odnosno razmak između točaka uliva i izliva. Veći radijus kružnog raskrižja omogućava bolje oblikovanje privoza sa stanovišta sigurnosti prometa i provoznosti raskrižja, dok primjena manjih radijusa uvjetuje tangecijalno rješavanje ulaza i izlaza, što se ne može ocijeniti povoljnim bez obzira što su zadovoljeni minimalni uvjeti propisani važećim hrvatskim smjernicama.

***Ključne riječi:** urbana kružna raskrižja, geometrija raskrižja, kapacitet kružnih raskrižja*

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vjekoslava Dukića bb, Rijeka
E-mail: {sanja.surdonja,deluka,sergije.babic}@gradri.hr

Abstract. *Application of roundabouts in the city finds its justification in the areas of reduced safety in the traffic (inappropriate speed, greater number of serious traffic accidents ...) or in places with unsatisfactory traffic flow. Justification of this type of intersection at the place of classic three-way or four-way intersections is conditioned by traffic justification which includes a number of criteria: traffic criteria, location criteria, safety criteria, capacity criteria, etc. The location conditions in the city represent a restricting factor in optimizing the type of intersection, or choice of the size of the inscribed radius which ensures free flow conditions. With regard to the above, the question is how much the inscribed radius of the roundabout affects its capacity. The paper analyzes the standards of some countries (Austria, England, Australia) in defining requirements for the geometric elements of roundabouts and the impact of different inscribed radii on the level of service of this intersection type. The analysis based on the Austrian method showed that the increase in radius does not necessarily increase the capacity of a roundabout. A far greater impact has the roundabout entrance and exit design or the achieved distance between the entrance and exit points. The larger the radius of the roundabout is, the better the design of the entrance from point of traffic safety and driving conditions in the roundabout. The result of applying a smaller radius is a more tangential entrance and exit that can not be evaluated positively although they met boundary conditions of design recommended by Croatian guidelines.*

Key words: *urban roundabouts, intersection geometry, roundabout capacity*

1. Urbana kružna raskrižja

Kružna raskrižja nalaze svoju primjenu na mjestima smanjene sigurnosti odvijanja prometa i na mjestima gdje njihova primjena jamči bolju protočnost prometa. Opravdanost primjene ovoga tipa raskrižja na mjestu smanjene sigurnosti utemeljuje se brojem prometnih nezgoda u ovisnosti o njihovim posljedicama, brzinama koje se postižu nakon uvođenja kružnih raskrižja u odnosu na period prije rekonstrukcije te drugim mjerama koje jamče sigurnost prvenstveno pješaka i biciklista. [1]

Bolja protočnost prometa vrlo se jednostavno opravdava usporedbom razine uslužnosti na postojećem raskrižju i planiranom kružnom raskrižju vodeći računa o definiranom projektnom (planskom) razdoblju, odnosno, procijenjenim stopama rasta prometa u tom razdoblju. [2, 3]

Kružna raskrižja u urbanim područjima se prema lokaciji i veličini (vanjskog radijusa) dijele na:

- mini kružna raskrižja - vanjskog radijusa od 7 do 12,50 metara,
- mala kružna raskrižja - vanjskog radijusa 11 do 17,50 metara,
- srednje velika kružna raskrižja - vanjskog radijusa od 15 do 20,00 metara. [1, 3]

Okvirni (teoretski) kapacitet navedenih raskrižja (pod pretpostavkom da imaju podjednako opterećena 4 privoza) za mini kružna raskrižja iznosi 10.000 voz/dan [3], za mala raskrižja je 15.000 voz/dan, a za srednje velika 20.000 voz/dan [1].

U pravilu se nezadovoljavajuće razine uslužnosti pojavljuju na raskrižjima smještenim u centru ili uz centar grada gdje prostorni uvjeti vrlo rijetko omogućavaju primjenu kružnih raskrižja većih vanjskih radijusa i kapaciteta. Analiza 5 potencijalnih lokacija za primjenu kružnih raskrižja u Rijeci pokazala je da je na 4 od 5 lokacija predviđen vanjski radijus koji ova raskrižja svrstava u srednje velika urbana raskrižja (u rasponu radijusa od 15 do 20 m), a samo je jedna lokacija prostorno omogućavala raskrižje vanjskog radijusa 22 m, dakle u kategoriji srednje velikog (jednotračnog) izvanurbanog raskrižja [2]. U navedenom slučaju rješenjima se, uzimajući u obzir raspoloživi prostor, nastojalo predvidjeti raskrižje najvećeg radijusa, i to dominantno iz razloga osiguravanja provoznosti. Postavlja se, međutim, pitanje utjecaja radijusa na kapacitet urbanih kružnih raskrižja i, posljedično, opravdanosti primjene određene veličine radijusa na lokaciji unutar urbane sredine gdje je prostor izrazito dragocjen jer ga dijele motorizirani i nemotorizirani sudionici u prometu.

Cilj ovoga rada je prikazati metode koje se uobičajeno koriste za proračun razine uslužnosti kružnih raskrižja te analizirati na koji način te metode uzimaju u obzir geometrijske elemente kružnoga raskrižja, odnosno druge potrebne elemente za proračun kapaciteta kružnoga raskrižja. Prema austrijskoj metodi koju hrvatske smjernice preporučuju [1] za unaprijed definirane uvjete izvedbe kružnih raskrižja, analizirano je dovodi li povećanje radijusa (unutar kategorije srednje velikih urbanih kružnih raskrižja tj, u rasponu od 15 do 20 m) do povećanja kapaciteta raskrižja i koliko, te koji elementi oblikovanja raskrižja dominantno utječu na njegov kapacitet.

Treba napomenuti da u ovome radu nisu analizirani ostali bitni elementi vezani za primjenu kružnih raskrižja u gradovima koje je neophodno provjeriti za cjelovitu analizu, a to je prisustvo intenzivnijih pješačkih i biciklističkih tokova u zoni raskrižja te provoznost mjerodavnih vozila (primjerice autobusa) kroz raskrižje.

2. Metode za proračun kapaciteta kružnog raskrižja

Veličina kružnog raskrižja prvenstveno ovisi o prometnim i prostornim uvjetima, što direktno utječe i na propusnu moć kružnog raskrižja.

Propusna moć kružnog raskrižja C određuje koliko vozila može proći kroz kružno raskrižje u određenoj vremenskoj jedinici. Dobije se kao zbroj propusnosti svih ulaza Q_{Ei} u kružno raskrižje:

$$C = \sum_1^n Q_E \quad [EOA/h] \quad (1)$$

gdje je n broj ulaza.

Propusnost ulaza Q_E određuje koliko vozila može ući u kružno raskrižje na jednom ulazu u vremenskoj jedinici:

$$Q_E = f(Q_C, \text{geometrije raskrižja ili ponašanja vozača})$$

gdje je Q_C prometno opterećenje u kružnom toku. [3]

Metode koje se koriste za proračun kapaciteta kružnog raskrižja uobičajeno se dijele na dvije vrste:

- a) metode temeljene na linearnoj regresiji (austrijska metoda, britanska linearna regresijska metoda, švicarska metoda i sl.) i
- b) metode koje se temelje na graničnim vremenskim intervalima slijeda vozila (australska metoda, metoda po Ning Wu i dr.).

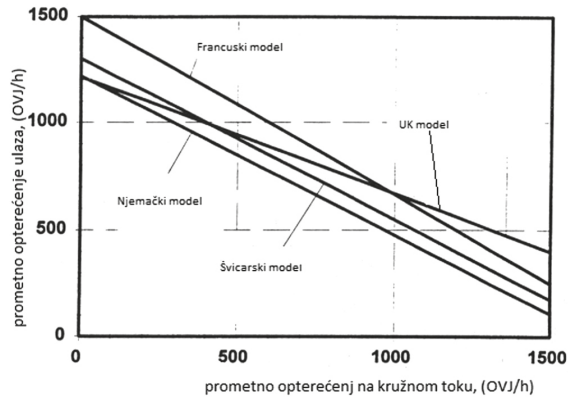
Prve modele bazirane na graničnim vremenskim intervalima slijeda vozila razvijaju Trutbeck (1989.) i Wu (1997.), dok je temelje za linearne regresijske modele postavio Kimber (1980.), a Stuwe (1992.) je razradio postupak kojim uvodi geometrijske parametre raskrižja u proračun. [4]

Slika 1 prikazuje različite metode (modele) razvijene u Engleskoj, Australiji, Švicarskoj i Njemačkoj. Engleski i australski modeli uključuju vanjski promjer "D" dok njemački i švicarski modeli ne ovise o promjeru i stoga, mogu biti usvojeni samo za opće planiranje, a ne i za detaljne izvedbene projekte. [5]

Usporedba različitih metoda pri proračunu kapaciteta kružnog raskrižja pokazala je da se rezultati dosta razlikuju zbog upotrebe različitih vrijednosti koeficijenata te zbog različitog ponašanja vozača u državama. Ono što je zajedničko svim metodama je da je propusna moć kružnog raskrižja u svim državama uvijek veća od propusne moći klasičnog nesemaforiziranog raskrižja iste veličine. [3]

Hrvatske smjernice za projektiranje raskrižja kružnog oblika [1] za proračun propusne moći preporučuju dvije metode: austrijsku i australsku.

Austrijska metoda proračuna propusne moći kružnog raskrižja koristi se obično kod malih i srednjih raskrižja, dok se za velika kružna raskrižja koristi nelinearna australska metoda. Zbog složenosti postupka proračuna, kod australske metode preporučuje se korištenje nekog od računalnih programa (npr.SIDRA).[1]

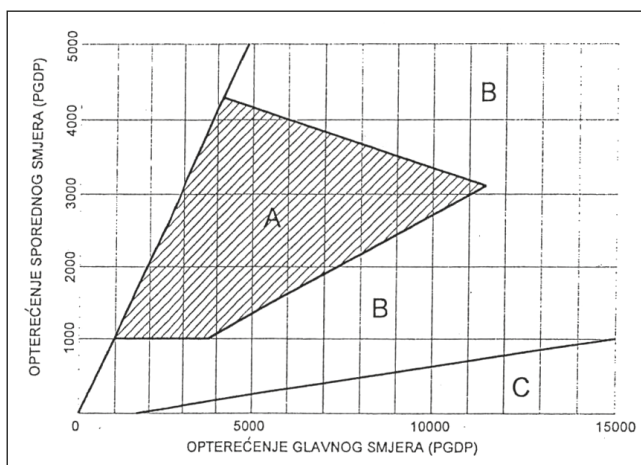


Slika 1. Usporedba ulaznog kapaciteta za jednostručna kružna raskrižja prema različitim metodama korištenim u različitim državama (Brilon i Vandehey, 1998.) [5]

2.1. Metode temeljene na linearnoj regresiji

2.1.1. Austrijska metoda[1]

Austrijska metoda na samom početku postupka provjere propusne moći sugerira procjenu opravdanosti izvedbe kružnog raskrižja na određenoj lokaciji i u određenim prometnim uvjetima (Slika 2). Ukoliko se opterećenost glavnog i sporednog smjera sijeku u području zone A, preporučljiva je izvedba kružnog raskrižja. Ukoliko se sijeku u području zone B, potrebno je provjeriti primjerenost izvedbe ostalih raskrižja, a ukoliko se sijeku u području zone C, preporučljiva je izvedba klasičnog raskrižja.



Slika 2. Primjerenost izvedbe kružnog raskrižja [1]

Propusna moć kružnog raskrižja ovisi o propusnoj moći ulaza u kružni tok, koji se određuje prema slijedećem izrazu:

$$L = 1500 - \left[\frac{8}{9} (b \cdot M_K + a \cdot M_A) \right] \quad [EOA/h] \quad (2)$$

gdje je:

L – propusna moć ulaza [EOA/h]

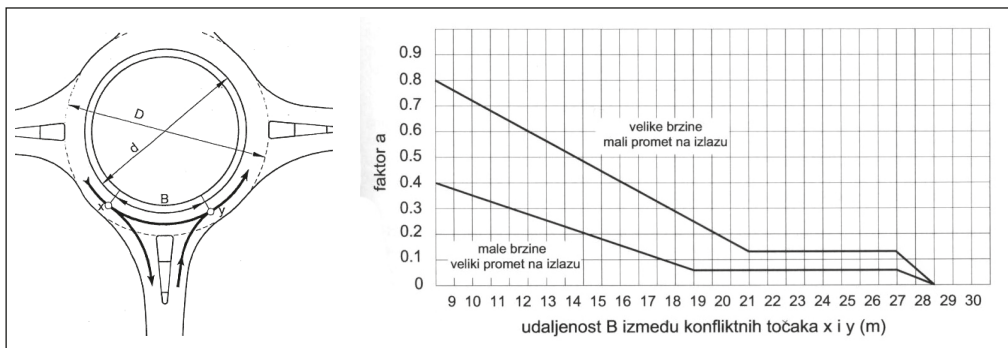
M_K – prometno opterećenje u kružnom toku, [EOA/h]

M_A – prometno opterećenje izlaza, [EOA/h]

a – koeficijent geometrije ulaza (određuje se prema Slici 3)

b – koeficijent broja voznih traka u kružnom raskrižju.

Koeficijent a ovisi o udaljenosti B konfliktnih točaka uliva i izliva vozila (Slika 3).



Slika 3. Mjerodavna udaljenost B između konfliktnih točaka x i y potrebna za određivanje koeficijenta a [1]

Udaljenost B računa se prema izrazu za slučaj jednostranog ulaza u kružno raskrižje (Slika 4) [1]:

$$B = \frac{(D - FB) \cdot \pi \cdot \varphi}{180} \quad [m] \quad (3)$$

gdje je:

D - vanjski promjer kružnog raskrižja [m]

FB - širina kružnog voznog traka [m]

φ - polovica središnjeg kuta između konfliktnih točaka [°].

Središnji kut φ ovisi o geometrijskoj izvedbi raskrižja

$$\sin \varphi = \frac{B'}{D - FB} \quad [rad] \quad (4)$$

pri čemu je B'

$$B' = \frac{(T + FB/2 + Z/2 \cdot \sin \alpha) \cdot W}{T} \quad [m] \quad (5)$$

gdje je:

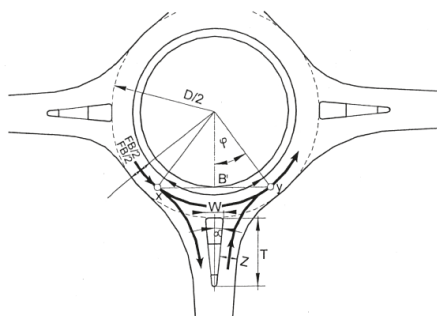
T - duljina razdjelnog otoka [m]

W - širina razdjelnog otoka [m]

Z - širina ulaza [m]

α - polovica oštrog kuta razdjelnog otoka [°]

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{W}{2T} \quad [rad] \quad (6)$$



Slika 4. Geometrijski elementi potrebni za određivanje udaljenosti B između konfliktnih točaka [1]

Koeficijent b izražava utjecaj broja voznih traka u kružnom kolniku (u zagradama su vrijednosti istog koeficijenta koje se koriste u Švicarskoj i Austriji):

jednotračna $b=0,90-1,00$ (0,90-1,00)

dvotračna $b=0,80-0,84$ (0,60-0,80).

Nakon određivanja propusne moći ulaza određuje se stupanj opterećenosti svakog ulaza prema izrazu:

$$A = \frac{c \cdot M_E}{L} \cdot 100 \quad [%] \quad (7)$$

gdje je:

A - stupanj opterećenosti [%]

M_E - prometno opterećenje ulaza [EOA/h]

L - propusna moć ulaza [EOA/h]

c - koeficijent broja prometnih traka na ulazu u raskrižje.

Koeficijent c ovisi o broju prometnih traka na ulazu (u zagradama su vrijednosti istog koeficijenta koje se koriste u Švicarskoj i Austriji):

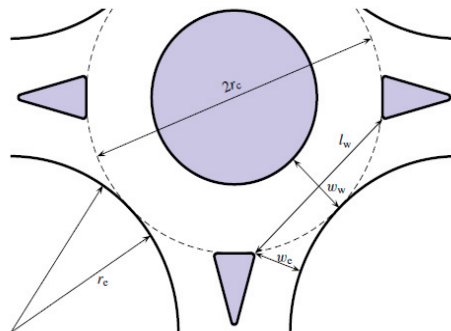
jednotračni ulaz $c=0,90-1,00$ (1,00)

dvotračni ulaz $c=0,50-0,65$ (0,60-0,70).

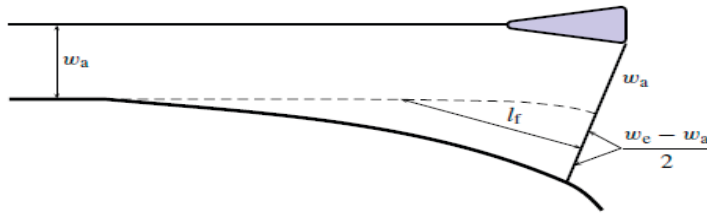
Stupanj opterećenosti ulaza ne smije prelaziti 90% maksimalnog satnog prometnog opterećenja [1].

2.1.2. Britanska linearna regresijska metoda [5, 6]

Kod ove metode, proračun kapaciteta kružnog raskrižja temelji se na odnosu između prometnog opterećenja ulaza i raznih geometrijskih parametara. Na primjer, kapacitet svakog privoza kružnom raskrižju linearno se smanjuje povećanjem ulaznog kuta. Ostali geometrijski parametri koje ova metoda uzima u obzir su: širina ulaza, širina ulaznog traka pred kružnim raskrižjem, ulazni radijus i vanjski promjer. Računalni programi koji se koriste za izračunavanje kapaciteta kružnog raskrižja koji se temelje na ovoj metodi su ARCADY (Assessment of Roundabout CAPacity and DelaY) i RODEL (ROundabout DELay). [5]



Slika 5. Geometrijski parametri potrebni za proračun prema britanskoj metodi [6]



Slika 6. Geometrijski parametri ulaza u kružno raskrižje, potrebni za proračun prema britanskoj metodi [6]

Kapacitet ulaza računa se prema geometrijskim parametrima prikazanim na Slikama 5 i 6, prema izrazu [6]:

$$C_P = \begin{cases} a_1(a_2 - a_3q_M), & \text{ako je } a_3q_M \leq a_2 \\ 0, & \text{ako je } a_3q_M > a_2 \end{cases} \quad [\text{voz/h}] \quad (8)$$

gdje je:

$$a_1 = 1 - 0.00347(\phi_C - 30) - 0.978(r_C^{-1} - 0.05) \quad (9)$$

$$a_2 = 303a_4 \quad (10)$$

$$a_3 = 0.210a_5 \quad (11)$$

$$a_4 = w_a + \frac{w_e - w_a}{1 + 2a_6} \quad (12)$$

$$a_5 = 1 + \frac{0.5}{1 + e^{(2r_C - 60)/10}} \quad (13)$$

$$a_6 = \frac{w_e - w_a}{l_f} \quad (14)$$

gdje je:

q_M - prometno opterećenje na kružnom toku [voz/h],

ϕ_C - ulazni kut [°],

r_C - vanjski polumjer kružnog raskrižja [m],

w_a - širina voznog traka [m],

w_e - proširenje voznog traka na ulazu [m],

l_f - duljina proširenja ulaza [m].

2.2. Metode temeljene na graničnim vremenskim intervalima slijeda vozila

2.2.1. Australaska metoda [3]

Australske smjernice za oblikovanje kružnih raskrižja koje je izdao National Association of Road Authorities (NAASRA) za proračun kapaciteta koriste australsku metodu.

Kod ove metode, kružno raskrižje se analizira kao niz uzastopnih trokrakih T-raskrižja na jednosmjernoj cesti na kojoj je glavni prometni tok koji ima prednost, dok se sporedni tok, izborom prihvatljivih udaljenosti između vozila na glavnom prometnom smjeru, uključuje u glavni prometni tok. [3]

Kapacitet kružnog raskrižja izračunava se primjenom kritične vremenske praznine između vozila. Pretpostavka je da mora postojati minimalni vremenski interval između dva vozila u prometnom opterećenju kružnog toka prije nego se vozilo sa privoza (sporednog smjera) uključi u tok. Što je taj vremenski interval veći, više od jednog vozila se može uključiti u kružni tok. Kapacitet se izračunava za svaki privoz zasebno kao funkcija prometnog opterećenja kružnog toka, kritičnog vremenskog intervala te vremenskog intervala između vozila koja se uključuju u kružno raskrižje ("follow-up vrijeme"). [3, 5]

Temelj ove metode proizlazi iz spoznaje da 5 sekundi vremenske praznine između vozila kružnog toka nudi 85% mogućnosti iskorištenja (uporabe).

SIDRA (Signalized and unsignalized Intersection Design and Research Aid) je računalni program koji se temelji na ovoj metodi prilikom proračuna kapaciteta kružnog raskrižja. [5]

Kapacite uliva računa se prema:

$$q_{e.\max} = \frac{q_t(1 - \Delta q_t)e^{-q_t(T-A)}}{1 - e^{-q_e T_0}} \quad [EOA/h] \quad (15)$$

gdje je:

q_t - prometno opterećenje u kružnom toku [EOA/h];

$q_{e.\max}$ - kapacitet uliva [EOA/h];

T - kritična vremenska praznina između vozila [s];

T_0 - vremenski interval između dva uzastopna vozila, koja iz kolone koja stoji ulaze u vremensku prazninu između vozila na glavnom prometnom smjeru (kružnom toku) [s];

Δ - minimalni vremenski interval između uzastopnih vozila na sporednom smjeru (privozu kružnom toku) [s]; [3]

Metoda dodatno nudi i proračun zastoja kolone na privozu (sporednom smjeru) za što je potrebno odrediti prihvatljive vremenske praznine između vozila.

Propusnost pojedinih prometnih trakova C dobije se iz izraza:

$$C = \frac{3600(1-\theta)q_c e^{-\lambda(t_a-\tau)}}{e^{-\lambda t_f}} \quad [EOA/h] \quad (16)$$

gdje je:

C - propusnost pojedinog ulaznog traka [EOA/h]

θ - postotak vozila u kružnom toku koja voze u redu [%]

q_c - prometno opterećenje u kružnom toku [EOA/h]

t_a - kritična vremenska praznina [s]

t_f - vrijeme slijeđenja ("follow up") [s]

τ - minimalno vrijeme slijeđenja u kružnom toku [s]

pri čemu je:

$$\lambda = \frac{(1-\theta)q_c}{1-\tau q_c} \quad [s] \quad (17)$$

Stupanj zasićenja dobije se iz odnosa ulaznog prometnog toka i propusne moći tog ulaza:

$$\chi = \frac{Q_m}{C} \quad (18)$$

gdje je:

Q_m - ulazni prometni tok [EOA/h]

C - propusnost ulaza [EOA/h].

Preporuka metode je da stupanj zasićenja kružnog raskrižja na kraju planskog razdoblja ne premašuje 0,8 do 0,9. [3]

2.2.2. Metoda po Ning Wu[7]

Ning Wu 1997.godine razvija formula za koju je karakteristično da uzima u obzir broj prometnih trakova na ulazu u kružno raskrižje te u kružnom kolniku.[7]

Kapacitet ulaza računa se prema izrazu [7]:

$$q_{u,\max} = \left[1 - \frac{\tau \cdot q_k}{n_n} \right]^{n_k} \cdot \frac{n_u}{t_{sl.}} \cdot \exp[-q_k \cdot (t_0 - \tau)] \quad [voz/h] \quad (19)$$

gdje je:

$q_{u,max}$ - kapacitet ulaza u kružno raskrižje [voz/h]

q_k - intezitet vozila u kružnom kolniku [voz/h]

n_u - broj prometnih trakova na ulazu

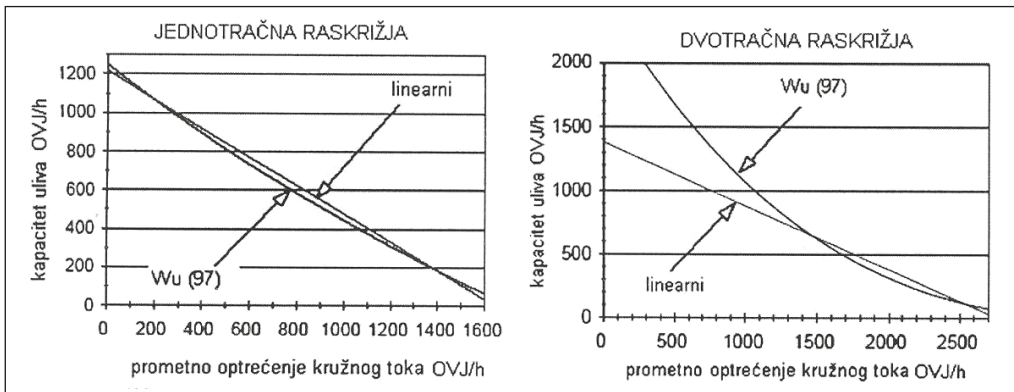
n_k - broj prometnih trakova u kružnom kolniku,

$$t_0 = t_g - \frac{t_{sl.}}{2} \quad [s] \quad (20)$$

t_g - granična vremenska praznina u slijedu vozila [s]

$t_{sl.}$ - vremenska praznina između vozila u slijedu [s]

τ - minimalna vremenska praznina između vozila u kružnom toku [s].



Slika 7. Kapacitet kružnog raskrižja prema različitim metodama [4]

Metoda po Ning Wu dala je slične rezultate kao i metode temeljene na linearnoj regresiji u slučaju jednostranog kružnog toka s jednostranim privozom, dok se kod dvotračnih raskrižja rezultati razlikuju (Slika 7).

3. Utjecaj brzine vozila i geometrijskih elemenata kružnog raskrižja na proračun kapacitet raskrižja

3.1. Kapacitet i brzina kretanja vozila u kružnom raskrižju

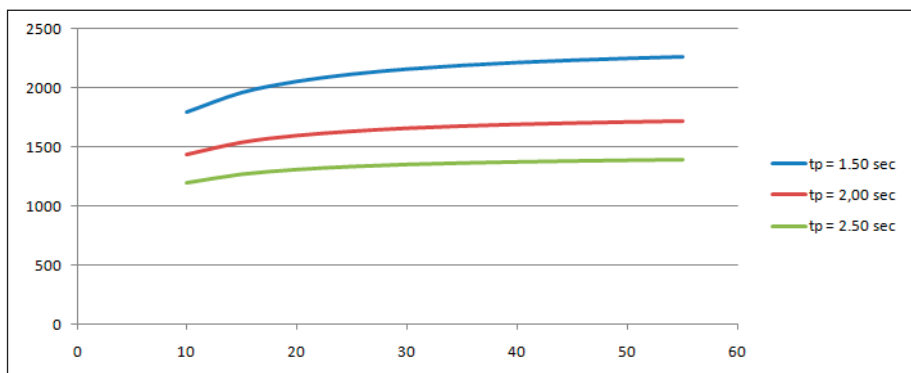
Opterećenje prometnog traka blisko kapacitetu ostvaruje se za homogene i neprekinute prometne tokove i povećava se povećanjem brzine kretanja vozila. Na kružnim raskrižjima ostvaruju se relativno niske brzine kretanja. Očekivane brzine kretanja kreću se u granicama od 25 km/h kod mini kružnih raskrižja, do 40 km/h kod srednje velikih kružnih raskrižja [1, 3]. Homogenost prometnog

toka se u proračunima kapaciteta uvodi kroz svođenje različitih kategorija vozila na određeni broj Ekvivalentnih Osobnih Automobila (EOA). Gustoća prometnog toka (EOA/km) ovisna je o potrebnom, odnosno ostvarenom razmaku između vozila koji se povećava pri većim brzinama kretanja vozila. Maksimalna gustoća prometnog toka se pri tome ostvaruje uz minimalni razmak vozila u koloni koji treba odgovarati očekivanom zaustavnom putu. Zaustavni put vozila određen je vremenom reakcije vozača i vremenom zaustavljanja vozila koje se pri malim brzinama kreće u granicama od $t_z = 1$ sec ($v=25$ km/h, $\mu=0.6$) do $t_z = 2$ sec ($v=40$ km/h, $\mu=0.6$). Vrijeme reakcije vozača ovisno je ne samo o sposobnostima vozača već i o karakteru okoline koja izaziva reakciju i kreće se u granicama $t_r=1.26$ sec do $t_r = 3.6$ sec (odgovara populaciji 90% vozača) [8]. Za vozače su kružna raskrižja područja posebne pažnje i usredotočenosti na okolnosti u odvijanju prometa pa se može reći da se očekivana vremena reakcije vozača nalaze bliže donjoj granici navedenih vrijednosti čemu odgovara i preporučeno vrijeme reakcije vozača od $t_r = 1.5$ sec. Vrijeme reakcije t_r i vrijeme zaustavljanja vozila t_p zajedno predstavljaju poželjno vrijeme prolaska dva uzastopna vozila odnosno “vrijeme praznine” t_p prometnog toka. Na Slici 8 prikazan je dijagram promjene kapaciteta jednog prometnog traka u ovisnosti o brzini kretanja vozila a za različita vremena t_p prema izrazu :

$$Q = \frac{v \cdot 3600}{Lv + (t_p \cdot v)} \quad [\text{voz} / \text{h}] \quad (21)$$

gdje je :

- Q - kapacitet prometnog profila ceste [voz/h],
- v - brzina kretanja vozila [m/s],
- Lv - duljina vozila i
- t_p - vrijeme praznine .



Slika 8. Teoretski kapacitet prometnog toka u ovisnosti o brzini vozila

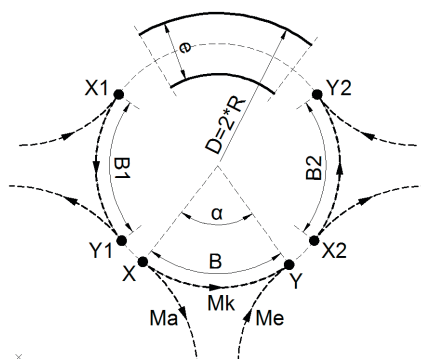
Iz Slike 8 uočljivo je da na kapacitet prometnog traka daleko veći utjecaj ima razmak vozila, odnosno “vrijeme praznine”, nego brzina kretanja vozila. Nadalje, ako se promatra realno područje brzine kretanja vozila (25 do 40 km/h), može se reći da je utjecaj promjene radijusa kružnog raskrižja, odnosno brzine kretanja vozila linearan i u granicama 5 do 10%. Realna prometna opterećenja kružnih raskrižja su često i veća od ovih prikazanih na Slici 8, što upućuje na zaključak da vozači u kružnom prometnom toku realno ne ostvaruju minimalno potrebne razmake vozila koji bi spriječili nalijetanje vozila, odnosno, da se u proračunima kapaciteta mogu usvojiti i niže vrijednosti vremena reakcije vozača. Ponašanje vozača u kružnom prometnom toku je predmet brojnih istraživanja kojima se nastoje utvrditi precizniji parametri za proračune kapaciteta i propusne moći raskrižja.[9]

3.2. Radijus vanjskog ruba kolnika i kapacitet kružnog raskrižja

Oblikovni elementi privoza kružnom raskrižju definirani su graničnim vrijednostima rubnih radijusa prema preporukama Smjernica [1]. Kut ulazne putanje u kružno raskrižje je pri tome kriterij uspješnosti oblikovanja privoza. Odstupanja od preporučenih vrijednosti mogu biti uzrok smanjenja razine sigurnosti prometa.

Za određivanje propusne moći kružnog raskrižja je, prema hrvatskim smjernicama, mjerodavna propusna moć ulaza u kružni tok. Proračun se vrši austrijskom metodom uz neznatno korigirane faktore primjenjive u našim prilikama, kako je detaljno opisano u ovom radu.

Kapacitet, odnosno propusna moć ulaza L određen je izrazom (2). Osim prometnog opterećenja na izlazu privoza M_a i u kružnom toku neposredno ispred ulaza M_k , u izrazu se koristi koeficijent a – koeficijent geometrije ulaza. Za određivanje vrijednosti koeficijenta a koristi se empirijski određen dijagram (Slika 3) ovisnosti koeficijenta a o udaljenosti B točaka uliva i izliva prometnih tokova privoza u odnosu na kružni tok prometa (konfliktne točke x i y). Koeficijent geometrije ulaza a prema Slici 3 može imati vrijednosti od $a=0.08$ za male brzine i veliki promet na izlazu, do $a=0.8$ za veće brzine i mali promet na izlazu. Pri istom prometnom opterećenju M_k i M_a , propusna moć ulaza bit će veća uz manju vrijednost faktora a . Pri tome, prema Slici 3, vrijednosti koeficijenta a u granicama 0.08 do 0.13 odgovaraju udaljenosti konfliktnih točaka B većim od 21 m. Na Slici 9 prikazane su putanje kretanja vozila u kružnom raskrižju s položajem konfliktnih točaka X i Y .



Slika 9. Putanja vozila u kružnom raskrižju s položajem konfliktnih točaka

Maksimalni razmak konfliktnih točaka B privoza postiže se poklapanjem izlazne točke X s ulaznom točkom Y1 prethodnog privoza i ulazne točke Y s izlaznom točkom X2 narednog privoza. Pri tome je zanemareno područje preplitanja prometnih tokova ulaza, izlaza i kružnog toka, što prema navedenoj metodi proračuna ne utječe na kapacitet privoza. Udaljenost konfliktnih točaka B na putanji vozila u kružnom toku tada je :

$$B = \frac{(D-u) \cdot \pi}{N} \quad [m] \quad (22)$$

gdje je :

N - broj privoza kružnom raskrižju,

u - širina kolnika kružnog toka prometa i

$D = 2R$ - promjer vanjskog ruba kružnog kolnika

Promjer vanjskog ruba kolnika tada je :

$$D = u + \frac{B \cdot N}{\pi} \quad [m] \quad (23)$$

Pod navedenim uvjetima, uz usvojenu vrijednost $u = 6.0$ m (jednotračan kolnik), poželjni radijus vanjskog ruba kolnika, odnosno radijus kod kojeg je moguće ostvariti poželjni razmak konfliktnih točaka $B > 21$ m bio bi :

za trokrako raskrižje : $R > 13.0$ m

za četverokrako raskrižje : $R > 16.40$ m

Iz navednog bi se dalo zaključiti da je kod srednje velikih (urbanih) kružnih raskrižja povoljnim oblikovanjem ulaza i izlaza moguće ostvariti poželjnu vrijednost razmaka konfliktnih točaka $B > 21$ m primjenom minimalno preporučenih vrijednosti radijusa vanjskog ruba kolnika.

3.3. Oblikovanje privoza i radijus vanjskog ruba kolnika

Oblikovni elementi privoza kružnom raskrižju opterećenog teškim teretnim vozilima definirani su graničnim vrijednostima rubnih radijusa prema preporukama hrvatskih smjernica kako je prikazano u Tablici 1. [1].

Tablica 1. Vanjski radijus kružnog raskrižja ovisno o polumjeru središnjeg otoka [1]

Vanjski polumjer R_V [m]	Širina kružnog voznog traka $R_V - R_U$ [m]	Uvjeti			
		Širina voznog traka na ulazu [m]	Širina voznog traka na izlazu [m]	Veličina ulaznog polumjera R_{Ul} [m]	Veličina izlaznog polumjera R_{Iz} [m]
13,00 - 17,50	6,50 - 8,00	3,25 - 3,50	3,50 - 3,75	10,00 - 12,00	12,00 - 14,00
17,50 - 22,50	5,75 - 6,50	3,50 - 4,00	3,50 - 4,25	12,00 - 14,00	14,00 - 16,00

Na prometno opterećenim gradskim raskrižjima gotovo redovito nailazimo i na komponentu teretnog prometa ili zglobna BUS vozila javnog prijevoza, tako da se izbor elementa raskrižja prema Tablici 1 pokazao primjerenim u realnim uvjetima odvijanja prometa. U radu su razmatrana raskrižja s vanjskim radijusima $R=15.0$ do $R=20.0$ m koja se prema veličini radijusa svrstavaju u srednje velika jednostručna kružna raskrižja. Preporučene vrijednosti ulaznih i izlaznih radijusa kreću se u granicama $10.0 \text{ m} < R_{ul} < 14.0 \text{ m}$ odnosno $12.0 \text{ m} < R_{iz} < 16.0 \text{ m}$. Širina kružnog kolnika primjerena je potrebama proвозnosti i kreće se u granicama $5.75 \text{ m} < u < 8.00 \text{ m}$.

Usvojene su za oblikovanje nepovoljnije granične vrijednosti primjenjivih elemenata:

minimalni elementi : $R=15.0 \text{ m}$, $R_{ul}=10.0 \text{ m}$, $R_{iz}=12.0 \text{ m}$, $u=8.0 \text{ m}$,

maksimalni elementi : $R=20.0 \text{ m}$, $R_{ul}=12.0 \text{ m}$, $R_{iz}=14.0 \text{ m}$, $u=6.5 \text{ m}$.

Pri tome, putanje kretanja vozila imaju nešto drugačije vrijednosti ovisno o širini kolnika, tako da je za konstrukciju elemenata kružnog raskrižja usvojeno:

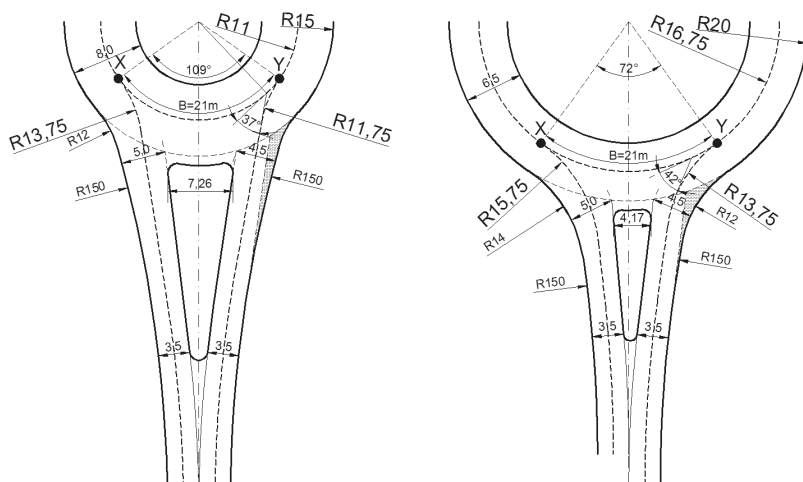
minimalni elementi putanje: $R=11.0 \text{ m}$, $R_{ul}=11.75 \text{ m}$, $R_{iz}=13.75 \text{ m}$

maksimalni elementi putanje: $R=16.75 \text{ m}$, $R_{ul}=13.75 \text{ m}$, $R_{iz}=15.75 \text{ m}$.

Konstrukcija privoza prema navedenim vrijednostima uz poštivanje poželjnog razmaka konfliktnih točaka $B > 21 \text{ m}$ prikazana je na Slici 10. Osnova za konstrukciju privoza su putanje kretanja vozila koje su načelno definirane kao središnjice prometnih traka.

Kut ulaza je pri ovako definiranim elementima veći od optimalnog iako je prvi dojam tangećijalnost privoza. Širina razdjelnog otoka na vrhu privoza se kod manjeg vanjskog radijusa bitno povećala. Iz Slike 10 vidljivo je da povećanje ulaznog i izlaznog radijusa neće bitno promijeniti konstrukciju privoza.

Poželjna udaljenost točaka uliva i izliva ($B=21$ m) primjenom minimalnog radijusa može se ostvariti kod trokrakih raskrižja, a primjenom većih radijusa moguća je konstrukcija i peterokrakih.



Slika 10. Konstrukcija privoza prema usvojenim graničnim vrijednostima

Uvriježeno je da se pri projektiranju kružnih raskrižja nastoji postići pravilni geometrijski odnos osi privoza (120° kod trokrakih, 90° kod četverokrakih raskrižja) te da se izbor radijusa kružnog kolnika svede na najveći mogući radijus u ograničenim uvjetima lokacije (urbana sredina).

Pravilniji izbor osnovnih konstruktivnih elemenata može se postići ako se proračunom opterećenosti privoza unaprijed odaberu poželjne vrijednosti razmaka konfliktnih točaka uliva i izliva koje će prema očekivanom prometnom opterećenju dati podjednake opterećenosti svih privoza. Zbroj tako dobivenih udaljenosti dat će nam minimalnu duljinu putanje vozila u kružnom toku iz čega se može odrediti minimalni potrebni radijus vanjskog ruba kolnika. Iz slike 10 vidljivo je da se takvim pristupom mogu osigurati preporučeni elementi oblikovanja i za zahtijevnije uvjete prometnog opterećenja.

Stupanj opterećenosti ulaza određen je izrazom (7). Ako pretpostavimo da je za prihvatljivo rješenje stupanj opterećenosti ulaza $A = 80\%$, tada iz (7) možemo odrediti potrebnu sposobnost ulaza kao:

$$L_{pot} = \frac{c \cdot Me}{80} \cdot 100 = 1.25 \cdot c \cdot Me \quad [EOA/h] \quad (24)$$

Tako određenim L_{pot} iz izraza (2) možemo odrediti potrebnu vrijednost koeficijenta a kao:

$$a = \frac{9}{8} \cdot \frac{L_{pot} - 1500 - \frac{8}{9} \cdot b \cdot Me}{Ma} \quad (25)$$

Nadalje, iz Slike 3 možemo odrediti potrebnu udaljenost B konfliktnih točaka izlaza x i ulaza y .

Ponavljanjem postupka za sve privoze kružnog raskrižja odrediti ćemo minimalno potreban radijus putanje vozila u kružnom toku kao :

$$R_{min} = \frac{\sum Bi}{2\pi} \quad [m] \quad (26)$$

Odnos duljina B_i ujedno je i poželjan odnos kuteva među privozima određen prema prometnom opterećenju kružnog raskrižja. Konačni izbor radijusa kružnog kolnika u urbanim sredinama ovisit će dakako o raspoloživom prostoru na lokaciji.

4. Zaključak

Tijekom vremena u svijetu se razvio velik broj metoda za proračun kapaciteta kružnog raskrižja. Metode su većinom na osnovu vlastitih iskustava i promatranja izgrađenih raskrižja prilagođene svakoj pojedinoj državi. Uočeno je da se osim geometrijskih elemenata u obzir uzima i ponašanje (reakcija) vozača koja se razlikuje između ostalog i prema prometnoj kulturi svake države.

Rad opisuje dva različita načina određivanja kapaciteta kružnog raskrižja, preko metoda temeljenih na linearnoj regresiji i preko metoda temeljenih na graničnim vremenskim intervalima slijeda vozila. Za svaki od ova dva načina uzete su kao primjer po dvije metode koje su u pravilu ugrađene u smjernice pojedinih država. Tako je austrijska metoda koja je i detaljnije analizirana u radu preporučena u austrijskim i hrvatskim smjernicama, britanska metoda

u engleskim smjernicama, a australska metoda u australskim smjernicama (a koristi se i kao dio računalnog programa SIDRA, veoma raširenog u svijetu).

Prema analizi temeljenoj na austrijskoj metodi proračuna opterećenosti privoza kružnom raskrižju i prikazanom utjecaju na određivanje radijusa kružnog raskrižja može se zaključiti da povećanje radijusa ne znači nužno i povećanje kapaciteta kružnog raskrižja. Daleko veći utjecaj na kapacitet ima oblikovanje ulaza i izlaza kružnog raskrižja, odnosno postignuti razmak između točaka uliva i izliva. Veći radijus kružnog raskrižja omogućava bolje oblikovanje privoza sa stanovišta sigurnosti prometa i provoznosti raskrižja.

Primjena manjih radijusa uvjetuje značajnije izraženu tangencijalnost pri oblikovanju ulaza i izlaza, što se može ocijeniti nepovoljnim iz aspekta sigurnosti odvijanja prometa bez obzira što su zadovoljeni hrvatskim smjernicama preporučeni granični geometrijski parametri.

U ovome radu nisu razmatrani uvjeti provoznosti mjerodavnog vozila koji ponekad imaju presudni utjecaj na izbor radijusa kružnog raskrižja i način oblikovanja privoza te ih se pri projektiranju treba analizirati.

5. Literatura

- [1] Dadić, Ivan; Tollazzi, Tollazzi, Tomaž; Legac, Ivan; Čičak, Mirko; Marić, Vladimir; Kos, Goran; Brlek, Predrag. *Smjernice za projektiranje i opremanje raskrižja kružnog oblika-rotora*, Institut prometa i veza, Zagreb, 2002.g.
- [2] Deluka-Tibljaš, Aleksandra; Babić, Sergije; Cuculić, Marijana; Šurdonja, Sanja. Possible reconstructions of intersections in urban areas by using roundabouts. *Road and rail infrastructure, Proceedings of the conference CETRA 2010*. 171-178, 2010.
- [3] Tollazzi, T.: *Kružna raskrižja*, IQ Plus, Kastav, 2007.
- [4] Ištoka Otković, Irena. Modeliranje kapaciteta kružnih raskrižja u Osijeku. *Tehnički vjesnik*. 15; 41-47, 2008.
- [5] Mohamed A., Aty; Yasser, Hosni. Final Report. State of the art report on: Roundabouts design, modeling and simulation, 2001.
- [6] Tapio, R., Luttinen. Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections. Finnish Road Administration, Helsinki, 2004.
- [7] Legac, Ivan; Šubić, Nikola; Pilko, Hrvoje. Analiza kapaciteta kružnih raskrižja u gradu Zagrebu. *Ceste*: 111-121, 2010.

- [8] Triggs, T., Harris, W.G. Reaction time of Drivers to Road Stimuli. Human Factors Report HFR-12, Monash University, Clayton, Australia, 1982
- [9] Cheng, Jie; Yang, Xinmiao; Deng, Wei; Huang, Xin. Driver's Critical Gap Calibration at Urban Roundabouts: A Case Study in China. *Tsinghua Science and Technology*: 18/20, 237-242, 2008.