

ČASOPIS "INŽENJERSTVO OKOLIŠA"

Godište / Volume 2 – Broj / Number 1 – Lipanj / June 2015

SADRŽAJ / CONTENT

Znanstveni rad / Scientific paper

Zvezdana Stančić, Dinko Vujević, Dragana Dogančić, Saša Zavrtnik, Ines Dobrotić, Zoran Bajsić, Ivana Dukši, Dragutin Vinček
SPOSOBNOST AKUMULACIJE TEŠKIH METALA KOD RAZLIČITIH SAMONIKLIH BILJNIH VRSTA
ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN DIFFERENT WILD PLANT SPECIES 7-18

Stručni radovi / Technical papers

Dinko Vujević, Petra Strahija, Tito Todorović, Mateja Novak, Aleksandra Anić Vučinić
MOGUĆNOST PONOVNE UPORABE VODE PRI PROIZVODNJI PROIZVODA NA BAZI BITUMENA
POSSIBILITIES OF WATER RECYCLING IN THE PRODUCTION OF BITUMEN BASED PRODUCTS 19-22

Lidija Runko Luttenberger, Dinko Vujević, Mario Šiljeg, Ivana Gudelj
POSTIZANJE RESURSNE UČINKOVITOSTI OBJEDINJAVANJEM SEKTORA ENERGETIKE, VODE I OTPADA
ACHIEVING RESOURCE EFFICIENCY THROUGH THE INTEGRATION OF ENERGY, WATER AND WASTE SECTORS 23-28

Bojan Đurin, Jure Margeta, Luka Jambrović
ANALIZA UTJECAJA REŽIMA RADA CRPNE STANICE NA POTREBNI VOLUMEN VODOSPREME
ANALYSIS OF THE IMPACT OF PUMPING STATION OPERATING REGIME ON REQUIRED WATER RESERVOIR VOLUME 29-36

Marija Đurinek, Krešo Ivandić, Stjepan Strelec
IN-SITU ISPITIVANJA TLA ZA POTREBE IZGRADNJE CRPNE STANICE SUSTAVA NAVODNJAVANJA VAŠKA-KAPINCI
IN-SITU SOIL TESTING FOR CONSTRUCTION OF PUMPING STATION OF IRRIGATION SYSTEM VAŠKA-KAPINCI 37-44

Pregledni rad / Review paper

Davor Stanko, Stjepan Strelec, Mario Gazdek, Alen Filipović, Nikola Kaniški
PROCJENA ODZIVA TLA MJERENJEM MIKROSEIZMIČKOG NEMIRA U GRADU VARAŽDINU
ASSESSMENT OF SITE EFFECTS USING MICROTREMOR MEASUREMENTS IN VARAŽDIN CITY 45-54

In Memoriam

Prof. dr. sc. Vladimir Patrčević (1946. – 2015.) 55



INŽENJERSTVO OKOLIŠA

Scientific and professional journal in the area
of environmental engineering

GEOTEHNIČKI
FAKULTET
SVEUČILIŠTA U
ZAGREBU
VARAŽDIN,
HRVATSKA



FACULTY OF
GEOTECHNICAL
ENGINEERING,
UNIVERSITY OF
ZAGREB
VARAŽDIN,
CROATIA

GODIŠTE / VOLUME 2
BROJ / NUMBER 1
LIPANJ / JUNE 2015



IMPRESSUM

Izdavač/Publisher:

GEOTEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU, Hallerova aleja 7, HR - 42000 Varaždin
Tel.: + 385 (0)42 408 900, Faks: + 385 (0)42 313 387
OIB: 16146181375, e - mail: ured.dekana@gfv.hr, URL: <http://www.gfv.unizg.hr>

Adresa uredništva/Editorial address:

GEOTEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU, Hallerova aleja 7, HR - 42000 Varaždin
Tel.: + 385 (0)42 408 900, Faks: + 385 (0)42 313 387
OIB: 16146181375, e - mail: casopis@gfv.hr, URL: <http://www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html>

Glavni urednik/Editor in Chief:

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec

Urednički odbor/Editorial board:

Prof. dr. sc. Mladen Božičević
Izv. prof. dr. sc. Ranko Biondić
Izv. prof. dr. sc. Sanja Kapelj
Izv. prof. dr. sc. Josip Mesec
Doc. dr. sc. Aleksandra Anić Vučinić
Doc. dr. sc. Milan Rezo
Doc. dr. sc. Zvezdana Stančić
Doc. dr. sc. Dinko Vujević

Tehnički urednici/Technical board:

Doc. dr. sc. Hrvoje Meaški
Dr. sc. Bojan Đurin
Davor Stanko, mag. Phys
Marija Đurinek, dipl.ing. građ.

Tisak/Printed by:

TIVA Tiskara d.o.o, Trg bana Jelačića 21, HR- 42000 Varaždin, Hrvatska

Naklada/Edition:

500 primjeraka/500 copies

Časopis izlazi dva puta godišnje. Svi radovi objavljeni u časopisu imaju međunarodnu recenziju.

Journal is published biannually. All papers published in journal have been reviewed.

Časopis je referiran/Journal is referred in: Hrčak – Portal znanstvenih časopisa RH.

ISSN 1849-4714 (Tisak)

ISSN 1849-5079 (Online)

UDK 62:502/504

Naslovna slika / Journal cover photo:
Foto Dorotea Strelec, Dan tehničke kulture u Varaždinu

Poštovano čitateljstvo,

Pred vama je novo izdanje časopisa Inženjerstvo okoliša. Radost uoči izlaska trećeg broja časopisa na kratko je zamijenila žalost i bol zbog smrti našeg kolege, prijatelja i dugogodišnjeg djelatnika prof. dr. sc. Vladimira Patrčevića, koji je ujedno bio i prvi glavni urednik časopisa Inženjerstvo okoliša. Svima koji su ga imali sreću poznavati ostat će u trajnoj i lijepoj uspomeni. In memoriam u njegovu čast objavljen je na zadnjim stranicama. Još jednom mu iskreno zahvaljujemo za uređivački rad i trud, čime je pridonio kvaliteti i čitanosti časopisa.

Ovom prigodom zahvaljujem uredničkom odboru časopisa na ukazanom povjerenju i imenovanju za novog glavnog urednika časopisa Inženjerstvo okoliša. Za mene je to izuzetna čast, veliki izazov i još veća odgovornost. Urednički odbor kontinuirano će ustrajati na povećanju kvalitete časopisa, njegove međunarodne prepoznatljivosti i u dogledno vrijeme indeksiranje u značajnijim svjetskim bibliografskim bazama. Radit će na povezivanju znanosti i spoznaja u gospodarstvu te kroz objavljene radove u koautorstvu pridonijeti afirmaciji interdisciplinarnog područja inženjerstva okoliša kod rješavanje problema koji su povezani s tlom, vodom i zrakom.

Sve to obvezuje na spremnost za sustavan rad kako bismo ostvarili kontinuirano izlaženje i pridonijeli prepoznatljivosti i uspješnosti časopisa povećanjem broja međunarodnih autora i recenzenata. Unaprijed zahvaljujemo svim autorima koji će naš časopis INŽENJERSTVO OKOLIŠA prepoznati kao mjesto prezentiranja svojih rezultata istraživanja i novih spoznaja i na taj način doprinjeli postavljenim ciljevima vezanim za razvoj časopisa.

U ovom broju odabrali smo šest recenziranih radova koji potvrđuju interdisciplinarnost tematike inženjerstva okoliša:

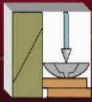
- SPOSOBNOST AKUMULACIJE TEŠKIH METALA KOD RAZLIČITIH SAMONIKLIH BILJNIH VRSTA
- MOGUĆNOSTI PONOVNE UPORABE VODE PRI PROIZVODNJI PROIZVODA NA BAZI BITUMENA
- POSTIZANJE RESURSNE UČINKOVITOSTI OBJEDINJAVANJEM SEKTORA ENERGETIKE, VODE I OTPADA
- ANALIZA UTJECAJA REŽIMA RADA CRPNE STANICE NA POTREBNI VOLUMEN VODOSPREME
- IN-SITU ISPITIVANJA TLA ZA POTREBE IZGRADNJE CRPNE STANICE SUSTAVA NAVODNJAVANJA
- PROCJENA ODZIVA TLA MJERENJEM MIKROSEIZMIČKOG NEMIRA U GRADU VARAŽDINU

Na posljednjim stranicama možete naći upute autorima za slanje radova kako bismo svim našim budućim autorima olakšali pripremanje tekstova i upoznali ih sa standardima koje slijedi urednički odbor. Časopis se izdaje i u elektroničkom obliku, on-line izdanju, te se može preuzeti na mrežnoj stranici: www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html.

Srdačan pozdrav,

Glavni urednik:

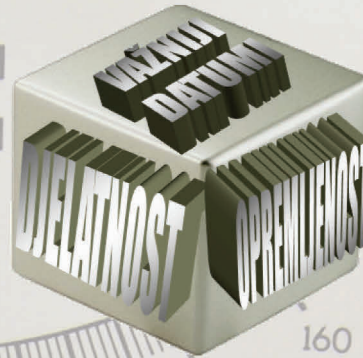
Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec



- Oformljen 1974. god. u sastavu tadašnje Više geotehničke škole
- Godine 2006. potpuno obnovljen, moderniziran i proširen
- Član udruge Hrvatski laboratoriji CROLAB
- Akreditiran od HAA prema normi HRN EN ISO/IEC 17025

Sudjeluje u

- Znanstvenim projektima čiji su nositelji djelatnici Geotehničkog fakulteta
- Stručnim i gospodarskim projektima iz područja geoinženjerstva, inženjerstva okoliša i graditeljstva



- Opremljen za provođenje svih standardnih geomehaničkih ispitivanja tla prema zahtjevima nacionalnih i svjetskih normi
- Raspolože s modernom opremom za znanstvena istraživanja iz područja mehanike tla
- Razvija vlastite uređaje za specijalna ispitivanja

1. Opća fizikalna svojstva tla

- vlažnost
- gustoća ; vlažna, suha, najmanja, najveća, čvrstih čestica tla
- relativna zbijenost nekoherentnog tla
- poroznost
- zasićenost vodom

2. Klasifikacijski testovi

- Atterberg-ove granice koherentnog tla: tečenja, plastičnosti, stezanja
- granulometrijski sastav: metoda sijanja, metoda areometriranja

3. Čvrstoća tla

- aksijalna čvrstoća sa slobodnim bočnim širenjem
- posmična čvrstoća; izravni posmik: UU, CD, reversni, po metodi Krey-Tiedemann
- troosni posmik: UU, CIU, CID
- nedrenirana čvrstoća: krilnom sondom, konusnim penetrometrom

4. Deformabilnost tla

ispitivanja u:

- standardnom edometarskom uređaju
- hidrauličkom edometarskom uređaju s mjerenjem pornog tlaka
- hidrauličkom edometarskom uređaju s ćelijom promjera 50 cm
- troosnom uređaju s dirigiranim odnosima vertikalnih i horizontalnih deformacija ili opterećenja

5. Posebna svojstva tla

- koeficijent hidrauličke vodljivosti (vodopropusnost) u ćelijama tipa FH i CH
- optimalna vlažnost prema standardnoj ili modificiranoj energiji zbijanja
- sadržaj organskih i gorivih tvari
- sadržaj kalcij-karbonata
- kut trenja suhog, rahlo nasipnog tla
- pH vrijednost



OPĆENITO
LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

SADRŽAJ – CONTENT***Znanstveni rad / Scientific paper***

- Zvezdana Stančić, Dinko Vujević, Dragana Dogančić, Saša Zavrtnik, Ines Dobrotić, Zoran Bajsić, Ivana Dukši, Dragutin Vincek
SPOSOBNOST AKUMULACIJE TEŠKIH METALA KOD RAZLIČITIH SAMONIKLIH BILJNIH VRSTA 7
ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN DIFFERENT WILD PLANT SPECIES

Stručni radovi / Technical papers

- Dinko Vujević, Petra Strahija, Tito Todorović, Mateja Novak, Aleksandra Anić Vučinić
MOGUĆNOSTI PONOVNE UPORABE VODE PRI PROIZVODNJI PROIZVODA NA BAZI BITUMENA 19
POSSIBILITIES OF WATER RECYCLING IN THE PRODUCTION OF BITUMEN BASED PRODUCTS

- Lidija Runko Luttenberger, Dinko Vujević, Mario Šiljeg, Ivana Gudelj
POSTIZANJE RESURSNE UČINKOVITOSTI OBJEDINJAVANJEM SEKTORA ENERGETIKE, VODE I OTPADA 23
ACHIEVING RESOURCE EFFICIENCY THROUGH THE INTEGRATION OF ENERGY, WATER AND WASTE SECTORS

- Bojan Đurin, Jure Margeta, Luka Jambrović
ANALIZA UTJECAJA REŽIMA RADA CRPNE STANICE NA POTREBNI VOLUMEN VODOSPreme 29
ANALYSIS OF THE IMPACT OF PUMPING STATION OPERATING REGIME ON REQUIRED WATER RESERVOIR VOLUME

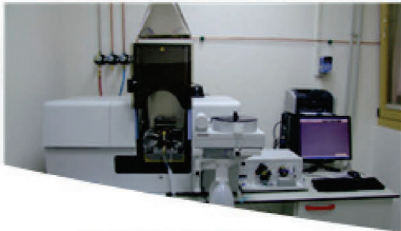
- Marija Đurinek, Krešo Ivandić, Stjepan Strelec
IN-SITU ISPITIVANJA TLA ZA POTREBE IZGRADNJE CRPNE STANICE SUSTAVA NAVODNJAVANJA VAŠKA-KAPINCI 37
IN-SITU SOIL TESTING FOR CONSTRUCTION OF PUMPING STATION OF IRRIGATION SYSTEM VAŠKA-KAPINCI

Pregledni rad / Review paper

- Davor Stanko, Stjepan Strelec, Mario Gazdek, Alen Filipović, Nikola Kaniški
PROCJENA ODZIVA TLA MJERENJEM MIKROSEIZMIČKOG NEMIRA U GRADU VARAŽDINU 45
ASSESSMENT OF SITE EFFECTS USING MICROTREMOR MEASUREMENTS IN VARAŽDIN CITY

In memoriam

- Prof. dr. sc. Vladimir Patrčević (1946. – 2015.) 55



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
 GEOTEHNIČKI FAKULTET
 Hallerova aleja 7, 42 000 VARAŽDIN
 Tel.: 042 / 408 - 900
 Fax: 042 / 313 - 587
 M.B. 03042316



GEOTEHNIČKI FAKULTET
 Zavod za hidrotehniku
 Laboratorij za geokemiju okoliša
 Tel.: 042 / 408 - 937
 Fax: 042 / 313 - 587
 E-mail: lgo@gfv.hr



LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

- osnovan je 2006. godine sa znanstvenom, stručnom i obrazovnom svrhom
- opremljen je instrumentima i pratećom opremom za prikupljanje uzoraka tala, sedimenata, prirodnih i otpadnih voda
- vrši terenske i laboratorijske analize prikupljenih uzoraka
- u suradnji s Varaždinskom županijom obavlja usluge agrokemijskih analiza tla

Zavod za hidrotehniku



LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

Tel.: 042 / 408 - 937
 Fax: 042 / 313 - 587
 Mob: 091 / 254 - 8745
 E-mail: lgo@gfv.hr

LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

Laboratorij je u sklopu Zavoda za hidrotehniku Geotehničkog fakulteta. Sudjeluje u izradi znanstvenih i stručnih projekata te u nastavi. Smješten je na 100 m² prostora, opremljen modernom i sofisticiranom opremom za provedbu geokemijskih terenskih i laboratorijskih ispitivanja.

Pokazatelji koje mjerimo u u uzorcima voda, eluata tala i sedimenata:

- ~ atomskom apsorpcijskom spektrometrijom mjerimo: Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sr, Ti, V, Zn
- ~ amonijak, nitriti, nitрати, ukupni N
- ~ bromidi, fenoli, fluoridi, fosfor, jodidi, kloridi, KPK
- ~ silikati, sulfidi, sulfati, sulfiti
- ~ suspendirana tvar, mutnoća
- ~ ukupna tvrdoća, karbonatna tvrdoća, nekarbonatna tvrdoća, kalcijeva tvrdoća, magnezijeva tvrdoća
- ~ slobodni CO₂, koncentracija otopljenog kisika i zasićenost kisikom
- ~ električna vodljivost, salinitet, ukupna otopljena tvar
- ~ trasiranje podzemnih tokova - koncentracija natrijevog fluoresceina
- ~ ukupni organski ugljik i ukupni dušik - TOC/TN
- ~ razaranje tla zlatotopkom
- ~ ekstrakcija izmjenjivih kationa iz tla amonijevim acetatom i kalijevim kloridom

~ sva ispitivanja radimo u skladu s važećim hrvatskim i europskim normama

Provođenje agrokemijskih analiza tla u svrhu racionalizacije gnojidbe, modernizacije poljoprivredne proizvodnje, povećanja prinosa i zaštite prirodnih resursa.

Ispitivanje svojstava prirodnih i otpadnih voda prema važećim pravilnicima.

Ispitivanje sastava eluata s odlagališta otpada.

Određivanje pH, pKCl, ukupnog CaCO₃, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, fosfora i kalija, humusa, teških metala i drugih kemijskih svojstava tla.

Kontakt: izv. prof. dr. sc. Sanja Kapelj, voditeljica laboratorija

Mob: 091 / 254 - 8745

e-mail: sanja.kapelj@zg.t-com.hr

doc. dr. sc. Anita Ptiček Siročić, zamjenica voditeljice laboratorija

tel: 042 / 408 - 957 e-mail: anitaps@gfv.hr

Laboratorij je akreditiran od strane HAA prema normi
 HRN ISO IEC 17025:2007 za ispitivanje voda

SPOSOBNOST AKUMULACIJE TEŠKIH METALA KOD RAZLIČITIH SAMONIKLIH BILJNIH VRSTA

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN DIFFERENT WILD PLANT SPECIES

Zvezdana Stančić ^{1*}, Dinko Vujević ¹, Dragana Dogančić ¹, Saša Zavrtnik ¹, Ines Dobrotić ¹, Zoran Bajsic ¹, Ivana Dukši ², Dragutin Vincek ²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, HR-42000 Varaždin, HRVATSKA,

² Varaždinska županija, Upravni odjel za poljoprivredu i zaštitu okoliša, Franjevački trg 7, HR-42000 Varaždin, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: zvezdana.stancic@gfvr.hr

Sažetak: Na području Varaždina u lipnju i srpnju 2013. na četiri postaje sakupljeni su uzorci tla i biljnog materijala kako bi se u njihovom sastavu odredila koncentracija sljedećih teških metala: bakra (Cu), cinka (Zn), kadmija (Cd), mangana (Mn), nikla (Ni), olova (Pb) i željeza (Fe). Za određivanje teških metala korištena je metoda atomske apsorpcijske spektrometrije. Cilj rada bio je odrediti sposobnost akumulacije teških metala kod sljedećih 11 čestih samoniklih biljnih vrsta: ambrozije (*Ambrosia artemisiifolia* L.), cikorijske (Cichorium intybus L.), jednogodišnje krasolike (*Erigeron annuus* (L.) Pers.), višegodišnjeg ljujla (*Lolium perenne* L.), uskolisnog trputca (*Plantago lanceolata* L.), velikog trputca (*Plantago major* L.), kiselice (*Rumex thyrsoflorus* Fingerh.), maslačka (*Taraxacum officinale* agg.), crvene djeteline (*Trifolium pratense* L.), bijele djeteline (*Trifolium repens* L.) i koprive (*Urtica dioica* L.). Rezultati su pokazali da je najveća koncentracija bakra ustanovljena u cikoriji (31,3 mg/kg), cinka u ambroziji (145,8 mg/kg), kadmija u maslačku (0,41 mg/kg), mangana u cikoriji (62 mg/kg), nikla u ambroziji (2,7 mg/kg), olova u jednogodišnjoj krasolici (0,97 mg/kg) i željeza u ambroziji (154 mg/kg). Dobivene vrijednosti mogu imati praktičnu primjenu kod fitoremedijacije onečišćenih tala. Najveće vrijednosti fitoakumulacijskih faktora dobivene su za cink kod ambrozije (2,61), za kadmij kod maslačka (1,04), za bakar kod ambrozije (0,98), za mangan kod cikorijske (0,16), za nikel kod ambrozije (0,14), za olovo kod uskolisnog trputca (0,0069) i za željezo kod ambrozije (0,0061). Vrijednosti fitoakumulacijskih faktora predstavljaju odnos između količine teških metala u tlu i biljnom materijalu, odnosno pokazatelj su koliko uspješno pojedine biljne vrste uklanjaju određene teške metale iz tla.

Ključne riječi: onečišćenje, fitoakumulacija, fitoremedijacija, Varaždin, Hrvatska.

Abstract: During June and July of 2013, samples of soil and plants were collected at four sites in the Varaždin region in order to determine concentrations of the following heavy metals in them: cadmium (Cd), copper (Cu), iron (Fe), lead (Pb), manganese (Mn), nickel (Ni) and zinc (Zn). Determination of heavy-metal content was performed using atomic absorption spectroscopy. The scope of this study was to determine the accumulation of heavy metals in the following 11 wild plant species: common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), chicory (*Cichorium intybus* L.), annual fleabane (*Erigeron annuus* (L.) Pers.), perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.), ribwort plantain (*Plantago lanceolata* L.), broadleaf plantain (*Plantago major* L.), compact dock (*Rumex thyrsoflorus* Fingerh.), dandelion (*Taraxacum officinale* agg.), red clover (*Trifolium pratense* L.), white clover (*Trifolium repens* L.) and stinging nettle (*Urtica dioica* L.). The results have shown that the highest concentration of cadmium is established in dandelion (0.41 mg/kg), of copper in chicory (31.3 mg/kg), of iron in common ragweed (154 mg/kg), of manganese in chicory (62 mg/kg), of nickel in common ragweed (2.7 mg/kg), of lead in annual fleabane (0.97 mg/kg), and of zinc in common ragweed (145.8 mg/kg). The values obtained could have practical purpose in the process of removal of heavy metals from contaminated soil by phytoremediation. The highest values of phytoaccumulation factors were obtained for zinc by common ragweed (2.61), for cadmium by dandelion (1.04), for copper by common ragweed (0.98), for manganese by chicory (0.16), for nickel by common ragweed (0.14), for lead by ribwort plantain (0.0069), and for iron by common ragweed (0.0061). The values of phytoaccumulation factors represent the relationship between the amounts of heavy metals in soil and plant samples, i.e. they show the efficiency of particular plant species in the uptake of a given heavy metal from the soil.

Keywords: pollution, phytoaccumulation, phytoremediation, Varaždin, Croatia.

Received: 30.01.2014 / Accepted: 02.02.2015

Published online: 19.06.2015

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Fitoremedijacija je metoda čišćenja tla pomoću biljaka. Predmet je mnogih istraživanja u posljednjih 20 godina (Morel *et al.* 2002; Sing *et al.* 2003; Suresh & Ravishankar 2004; Sarma 2011). Pokazalo se da biljke iz tla mogu ukloniti različite vrste onečišćivala, a vrlo su uspješne u uklanjanju teških metala (Brooks 1998; Prasad & Freitas 2003; Hooda 2007; Padmavathiamma

& Loretta 2007; Kramer 2010; Rascio & Navari-Izzo 2011; Ali *et al.* 2013). Povećane koncentracije teških metala u okolišu javljaju se kao posljedica prometa, industrije, rudarstva, izgaranja fosilnih goriva, galvanizacije, proizvodnje energije, odlaganja otpada, ispuštanja otpadnih voda, upotrebe poljoprivrednih gnojiva, pesticida, poplava, vojnih aktivnosti i drugo

(Nedelkoska & Doran 2000; Sing *et al.* 2003). Tla koja su onečišćena teškim metalima mogu se sanirati primjenom raznih kemijskih, fizikalnih i bioloških metoda. Međutim, kemijske i fizikalne metode uzrokuju ireverzibilne promjene svojstava tala, uništavaju biološku raznolikost i vrlo su skupe. Suprotno tome, fitoremedijacija je relativno jeftina biološka metoda, uglavnom bez štetnih posljedica za žive organizme i plodnost tla. Stoga mnogi znanstvenici istražuju fitoremedijaciju s različitih aspekata i tragaju za biljnim vrstama koje imaju što je moguće veću sposobnost akumulacije teških metala. Dosad je u čitavom svijetu poznato nekoliko stotina vrsta viših biljaka koje imaju sposobnost akumulacije različitih onečišćivala (Kramer 2010; PHYTOREM 2013). Međutim, treba istaknuti da većina biljnih vrsta ima ograničeno područje rasprostranjenosti, a vrlo je malo biljaka kozmopolita. Stoga je za svako područje sa specifičnim klimatskim, pedološkim, geološkim i ekološkim karakteristikama potrebno pronaći biljne vrste koje se potencijalno mogu upotrijebiti u fitoremedijaciji.

Cilj rada bio je utvrditi sposobnost fitoakumulacije teških metala kod čestih samoniklih biljaka koje rastu na području Varaždina.

2. METODE RADA

2.1. Biljne vrste

Sposobnost fitoremedijacije teških metala ispitivana je pomoću samoniklih biljaka. Biljne vrste korištene u ovim istraživanjima odabrane su na osnovi sljedećih kriterija:

- česte vrste na zelenim gradskim površinama,
- vrste koje stvaraju znatnu biomasu nadzemnih dijelova (listova, stabljika i cvatova) koja se može ukloniti košnjom u svrhu fitoremedijacije,
- vrste za koje je već dokazano (PHYTOREM 2013) da imaju sposobnost fitoakumulacije teških metala.

Odabrane su sljedeće vrste:

- ambrozija (*Ambrosia artemisiifolia* L.),
- bijela djetelina (*Trifolium repens* L.),
- cikorija (*Cichorium intybus* L.),
- crvena djetelina (*Trifolium pratense* L.),
- dvodomna kopriva (*Urtica dioica* L.),
- jednogodišnja krasolika (*Erigeron annuus* (L.) Pers.),
- kiselica (*Rumex thyrsiflorus* Fingerh.),
- maslačak (*Taraxacum officinale* agg.),
- uskolisni trputac (*Plantago lanceolata* L.),
- veliki trputac (*Plantago major* L.),
- višegodišnji ljulj (*Lolium perenne* L.).

Navedene vrste rastu na različitim tipovima gradskih staništa. Maslačak, bijela djetelina, uskolisni trputac i višegodišnji ljulj rastu na zelenim travnjačkim površinama koje se često kose tijekom vegetacijske sezone, u prosjeku 10 puta godišnje, a prekrivaju znatne površine gradskih parkova, površina uz ceste, zelene otoke između prometnica i slična mjesta. Na travnjačkim površinama, koje se kose nešto rjeđe, pored četiri prethodno navedene vrste, raste i cikorija, crvena djetelina i kiselica. Veliki trputac prvenstveno je biljka gaženih staništa kao što su

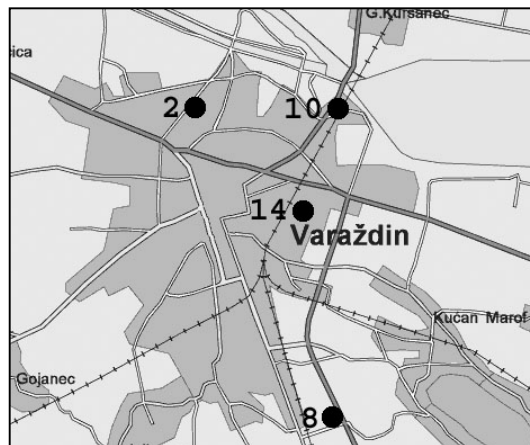
staze, dvorišta, igrališta i slična mjesta, premda s manjim pokrovnim vrijednostima raste i na drugim tipovima travnjačkih površina. Kopriva raste na polu-sjenovitim staništima, obično uz ograde i živice. Ambrozija i jednogodišnja krasolika spadaju u strane invazivne vrste u Hrvatskoj (Boršić *et al.* 2008), a u većem broju rastu na mjestima gdje je prethodno uklonjen biljni pokrov.

2.2. Teški metali

U ovim istraživanjima u uzorcima tla i biljnog materijala određivani su sljedeći teški metali: bakar (Cu), cink (Zn), kadmij (Cd), mangan (Mn), nikal (Ni), olovo (Pb) i željezo (Fe). Navedeni teški metali prirodno su prisutni u tlu do određenih koncentracija (Halamić & Miko 2009; Kisić 2012), a iznad tih koncentracija mogu se javiti kao posljedica antropogenog onečišćenja. Povećane koncentracije teških metala preko biljaka dopijevaju u hranidbeni lanac, između ostalog i do čovjeka. Problem je što su svi teški metali iznad određenih vrijednosti toksični za žive organizme te izazivaju razna oštećenja i bolesti živih organizama, a u slučajevima ekstremnih emisija u okoliš i smrt (WHO 1997). Nadalje, treba naglasiti da se teški metali prema ulozi u živim bićima dijele u dvije skupine: na biogene (esencijalne) ili one koji u manjim količinama sudjeluju u građi i metabolizmu živih bića i one ne-biogene (ne-esencijalne) koji nisu potrebni živim bićima (Adriano 2001). U ovim istraživanjima u biogene teške metale spadaju Cu, Fe, Mn, Ni i Zn, a u ne-biogene Cd i Pb.

2.3. Područje istraživanja

Biljne vrste i uzorci tla sakupljeni su na četiri postaje (Slika 1) na području grada Varaždina tijekom lipnja i srpnja 2013. godine. S obzirom da su podaci za ovaj rad sakupljeni u okviru projekta „Uklanjanje teških metala fitoremedijacijom na području Varaždina i okolice“ (Stančić & Vujević 2013), u ovome radu zadržani su izvorni brojevi postaja. Naime, za potrebe spomenutog projekta ukupno je obrađeno 16 postaja od čega su za ovaj rad odabrane one četiri na kojima je sakupljen veći broj različitih biljnih vrsta.



Slika 1. Prikaz istraživanih postaja označenih crnim točkama na karti Varaždina. Izvor karte: <http://www.erg.hr/vz-karta.htm>; 11.12.2013.

Opisi postaja:

Postaja 2

Trg Antuna Gustava Matoša, oko 18 m od glavne ceste i oko 8 m od sporedne ceste. Gauß-Krüger-ove koordinate: x – 5602930, y – 5131336. Datum uzimanja uzoraka: 18.06.2013. Zapažanja: tratina se redovito kosi, visina biljaka 10-15 (20) cm, postaja djelomično u sjeni stabala (javora), površina se koristi kao park, postaja uz slabo prometnu cestu.

Postaja 8

Benzinska stanica Šilec, u blizini parkirališta, Cehovska ulica. Gauß-Krüger-ove koordinate: x – 5604963, y – 5127348. Datum uzimanja uzoraka: 26.06.2013. Zapažanja: površina se redovito kosi, visina vegetacije 15 cm, površina nasipana tlom prije oko 10 godina kada je građena benzinska stanica, postaja uz vrlo prometnu cestu.

Postaja 10

Međimurska ulica, u blizini mosta preko Drave, zeleni otok između glavne i sporedne ceste širine oko 2 m, kod adrese: Međimurska 30. Gauß-Krüger-ove koordinate: x – 5604778, y – 5131417. Datum uzimanja uzoraka: 26.06.2013. Zapažanja: površina se redovito kosi, visina vegetacije je oko 20 cm, postaja uz vrlo prometnu cestu.

Postaja 14

Svilarska ulica, uz ogradu tvornice VIS, u blizini ulaza, zelena površina širine oko 1,5 m. Gauß-Krüger-ove koordinate: x – 5604328, y – 5130056. Datum uzimanja uzoraka: 02.07.2013. Zapažanja: površina se više-manje redovito kosi, odnosno 0,5 m uz cestu se redovito kosi dok uz ogradu rjeđe, visina vegetacije 10–30 cm, postaja uz slabo prometnu cestu.

2.4. Laboratorijske analize

Na svakoj postaji sakupljen je prosječni uzorak tla sastavljen od tri pojedinačna uzorka koji su uzimani u gornjem sloju do dubine od 15 cm. Biljni materijal uzorkovan je na način da su sakupljeni samo nadzemni dijelovi: listovi, stabljike i cvatovi. Na sve četiri postaje sakupljen je maslačak, uskolisni trputac i bijela djetelina, na dvije postaje višegodišnji ljulj, dok su ostale vrste sakupljene na pojedinačnim postajama ovisno o tome gdje su pronađene.

Svježi biljni materijal prije sušenja dobro je ispran destiliranom vodom kako bi se uklonila prašina istaložena iz zraka, nakon čega je osušen na zraku u trajanju od mjesec dana, a potom usitnjen.

Priprema tla za fizikalne i kemijske analize (sušenje, mljevenje, sijanje i homogeniziranje) provedena je prema normi HRN ISO 11464.

Za mjerenje teških metala, uzorci tla i biljnog materijala su pripremljeni ekstrakcijom pomoću zlatotopke prema modificiranoj HRN ISO 11466:2004 (Marković 2003).

Detekcija teških metala provedena je pomoću atomske apsorpcijske spektrometrije uređajem Perkin Elmer Aanalyst 800, 2006. (PerkinElmer 2000).

Budući da topljivost teških metala u vodi i njihova mobilnost kao i njihova akumulacija u biljkama ovisi o pH reakciji tla, određene su pH vrijednosti tla u vodenoj otopini i 1 M otopini kalijeva klorida (KCl) u omjeru 1:2,5 (m/v) prema HRN ISO 10390:2004 pomoću pH metra HACH, Sension 156, 2005.

Adsorpcija teških metala u tlu također ovisi o mehaničkim svojstvima tla i količini humusa. Mehanički sastav tla ili tekstura određen je prema normi HRN ISO 11277:2011, a sadržaj humusa po Tjurinu (Škorić 1982).

Na temelju dobivenih podataka o teksturi, tlo je klasificirano u teksturne klase prema FAO (2006).

Određivanje stupnja onečišćenja tla teškim metalima na pojedinim postajama provedeno je prema Pravilniku o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (NN 09/14). Prema navedenom Pravilniku stupanj onečišćenja (So) se računa pomoću sljedeće formule:

$$So (\%) = \frac{\text{ukupni sadržaj teških metala u zemljištu}}{\text{maksimalno dopuštena vrijednost}} \times 100$$

Tlo se na osnovi stupnja onečišćenja (So) kao i na osnovi teksturne klase, pH vrijednosti te masenog udjela humusa prema važećem Pravilniku (NN 09/14) dijeli u sljedeće kategorije:

- čisto, neopterećeno zemljište, So < 25 %;
- zemljište povećane onečišćenosti, So: 25 -50 %;
- zemljište velike onečišćenosti, So: 50 – 100%;
- onečišćeno zemljište, So: 100 – 200 %;
- zagađeno zemljište, So > 200%.

Kako bi se utvrdio odnos između koncentracije teških metala u biljkama i tlu, odnosno sposobnost fitoakumulacije teških metala, za svaku ispitivanu biljnu vrstu i za svaki ispitivani teški metal izračunat je fitoakumulacijski faktor (FAF) (U.S. EPA 2000, 2014; Nowell *et al.* 1999) koji se u literaturi još naziva i bioakumulacijski koeficijent (Morel *et al.* 2002) prema formuli:

$$FAF = \frac{\text{koncentracija metala suha biljka}}{\text{koncentracija metala suho tlo}}$$

3. REZULTATI I RASPRAVA

3.1. Vrijednosti teških metala u tlu, tekstura tla, količina humusa i pH vrijednosti tla

Rezultati analiza teških metala u tlu za pojedine postaje prikazani su u Tablici 1 iz koje je vidljivo sljedeće:

- vrijednosti bakra (Cu) u tlu na promatranim postajama kreću se u rasponu od 24,8 do 38,5 mg/kg suhoga tla, najviša vrijednost zabilježena je na postaji 2;
- vrijednosti cinka (Zn) kreću se u rasponu od 55,8 do 154,9 mg/kg suhoga tla, najviša vrijednost zabilježena je na postaji 14;
- vrijednosti kadmija (Cd) u tlu na promatranim postajama kreću se u rasponu od 0,25 do 1,13 mg/kg suhoga tla, najviša vrijednost zabilježena je na postaji 14;

- vrijednosti mangana (Mn) kreću se u rasponu od 398 do 548 mg/kg suhoga tla, najviša vrijednost zabilježena je na postaji 2;
- vrijednosti nikla (Ni) kreću se u rasponu od 19,2 do 43,3 mg/kg suhoga tla, najviša vrijednost zabilježena je na postaji 14;
- vrijednosti olova (Pb) kreću se u rasponu od 50,48 do 155,60 mg/kg suhoga tla, najviša vrijednost zabilježena je na postaji 14;
- vrijednosti željeza (Fe) kreću se u rasponu od 20509 do 27814 mg/kg suhoga tla, najviša vrijednost zabilježena je na postaji 10.

Rezultati analize teksturnog sastava tla (Tablica 2) pokazuju da se na postaji 2 nalazi ilovasti pijesak, na postaji 8 pijesak, na postajama 10 i 14 pjeskovita ilovača. Tekstura tla određuje mogućnost zadržavanja teških metala u tlu. Naime, tla s krupnijim česticama mogu vezati manju količinu teških metala i zbog toga imaju niže maksimalne dozvoljene količine (MDK) teških metala u tlu prema Pravilniku (NN 09/14) i obrnuto tla sa sitnijim česticama imaju veći kapacitet vezanja teških metala i stoga imaju i više MDK vrijednosti (Tablica 3).

Količine izmjerenog humusa (Tablica 2) kreću se u rasponu vrijednosti od 2,3 do 8,7 %. Sadržaj humusa u tlu važan je za određivanje stupanja onečišćenja tla teškim metalima prema Pravilniku (NN 09/14).

Vrijednosti pH za tlo izmjerene u vodenom eluatu (Tablica 2) za istraživane postaje kreću se u rasponu od 7,94 do 8,31. Prema reakciji, na osnovi podjele prema Thunu (Škorić 1982), tla sa sve četiri postaje pokazuju alkalnu reakciju. Reakcija tla utječe na kapacitet ionske izmjene glina i organske tvari, topivost i dostupnost mnogih elemenata, topivost oksida i hidrokksida nekih metala (Zwahlen 2004). Nadalje, pH vrijednost tla utječe direktno i indirektno na mobilnost, tj. zadržavanje metala u tlu. Većina kationa metala je bolje pokretljiva (topljiva), a time i biodostupna u tlima nižeg pH, dok u tlima višeg pH dolazi do adsorpcije. Na primjer, za bakar optimalan pH za njegovu biodostupnost je između 4,5 i 6. Cink je bolje dostupan biljkama u tlima nižeg pH (<4,5) te ukoliko se nalazi vezan na organometalne komplekse. Kod kadmija povišenjem pH tla smanjuje se njegova biodostupnost. Mangan je u ionskom obliku (Mn^{2+}) mobilan samo u kiselim uvjetima, a nedostatak mangana uočava se u tlima s $pH > 6$. Nikal i njegovi spojevi su relativno topljivi kod $pH < 6,5$, a netopljivi kod $pH > 6,7$. Za željezo u kiselim uvjetima ioni (Fe^{2+}) su jako topljivi, a u alkalnim uvjetima inhibirana je sorpcija željeza od strane biljaka što ima za posljedicu njegov manjak u biljkama. Mobilnost olova ne ovisi o pH vrijednosti tla i prilično je mala zbog njegove sklonosti vezanja na organsku tvar tla. (Marschner 2003; Halamić & Miko 2009)

Uz pH tla u vodenoj otopini izmjerena je i pH vrijednost u otopini 1 M kalijeva klorida (KCl). Razlika između vrijednosti pH tla mjerene u otopini kalijeva klorida i vodenom eluatu (ΔpH) poznata je kao efekt soli (Marković 2003). Negativne vrijednosti ΔpH znače da u tlu prevladavaju negativno nabijene

čestice koje imaju dobar kapacitet vezivanja kationa između ostalih i teških metala. Osnovni nositelji negativnog naboja u tlu su čestice organske tvari, oksidi i hidrokksidi željeza, aluminija i mangana te minerali glina. Naboj čestica važan je pokazatelj adsorpcijske sposobnosti tla.

Na osnovi izmjerenih koncentracija teških metala u tlu (Tablica 1), teksturnog sastava tla (Tablica 2), količine humusa (Tablica 2), pH vrijednosti (Tablica 2) i MDK teških metala u tlu (Tablica 3) određen je stupanj onečišćenja tla (So) za pojedine teške metale i pojedine postaje (Tablica 4).

Rezultati (Tablica 4) pokazuju da je na postaji 2 (Trg Antuna Gustava Matoša), koja se nalazi u blizini slabo prometne ceste, prema masenom udjelu kadmija i bakra zemljište kategorizirano kao zemljište velike onečišćenosti, na temelju masenog udjela nikla i olova zemljište pripada kategoriji onečišćenog zemljišta, a na temelju udjela cinka zemljište se kategorizira kao zagađeno zemljište.

Na postaji 8 (benzinska stanica Šilec), koja se nalazi u blizini vrlo prometne ceste, prema masenom udjelu kadmija i bakra zemljište se kategorizira kao zemljište povećane onečišćenosti, na temelju udjela nikla i cinka zemljište pripada kategoriji zemljišta velike onečišćenosti, a na osnovi udjela olova zemljište se kategorizira kao onečišćeno zemljište.

Na postaji 10 (Međimurska ulica), koja se nalazi u blizini vrlo prometne ceste, prema masenom udjelu kadmija i bakra zemljište se kategorizira kao zemljište velike onečišćenosti, na temelju udjela nikla i cinka zemljište pripada kategoriji onečišćenog zemljišta, a na osnovi udjela olova zemljište se kategorizira kao zagađeno zemljište.

Na postaji 14 (Svilarska ulica, VIS), uz slabo prometnu cestu i industrijsko postrojenje koje je mogući izvor onečišćenja (Hrgarek *et al.* 2006), prema masenom udjelu bakra zemljište se kategorizira kao zemljište velike onečišćenosti, na temelju udjela nikla zemljište pripada kategoriji onečišćenog zemljišta, a na osnovi udjela kadmija, olova i cinka zemljište se kategorizira kao zagađeno zemljište.

Zaključno, niti jedna od četiri ispitivane postaje nema čisto, teškim metalima neopterećeno tlo.

Treba naglasiti da se navedeni Pravilnik (NN 09/14), na osnovi kojeg je procijenjeno onečišćenje tla teškim metalima, odnosi na poljoprivredna zemljišta gdje tolerancija prisutnosti štetnih tvari treba biti na minimalnim vrijednostima. Međutim, budući da u Hrvatskoj ne postoji niti jedan drugi propis koji bi regulirao dozvoljene koncentracije teških metala u tlu, ovdje je korišten jedini postojeći.

Dakle, može se zaključiti da na mjestima gdje postoji onečišćenje prometom i industrijom, postoje povećane koncentracije teških metala u tlima. Nadalje, budući da se radi o zelenim gradskim površinama, na kojima nema uzgoja voća i povrća te stočne hrane, povećane vrijednosti mogu se tolerirati. Pokošene biljke ostavljaju se na zelenim gradskim površinama, služe kao gnojivo, a ujedno se onečišćivala akumulirana u biljkama ne raznose na druge lokalitete.

Tablica 1. Vrijednosti teških metala u tlu na postajama na području grada Varaždina.

Postaja	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
2	0,37	38,5	26506	548	38,7	63,81	149,1
8	0,25	24,8	25140	398	19,2	50,48	55,8
10	0,48	32,7	27814	449	34,2	126,62	100,8
14	1,13	37,7	20509	400	43,3	155,60	154,9

Tablica 2. Tekstura tla, količina humusa i pH vrijednosti tla izmjerene u vodi (pH_{H2O}) i otopini kalijeva klorida (pH_{KCl}) s četiri postaje na području grada Varaždina. ΔpH označava razliku između pH_{H2O} i pH_{KCl}.

Postaje	pijesak (0,063 mm - 2 mm) %	prah (0,002 mm - 0,063 mm) %	glina (< 0,002 mm) %	Teksturna klasa	Humus %	pH _{H2O}	pH _{KCl}	ΔpH
2	79,99	20,00	0,01	ilovasti pijesak	3,7	7,94	7,29	-0,65
8	100,00	0,00	0,00	pijesak	7,3	7,97	7,04	-0,93
10	60,00	40,00	0,00	pjeskovita ilovača	2,3	8,31	7,31	-1
14	70,00	30,00	0,00	pjeskovita ilovača	8,7	7,94	7,18	-0,76

Tablica 3. Maksimalno dopuštene količine (MDK) teških metala u tlu prema Pravilniku (NN 09/14) za određeni teksturni sastav tla.

	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
MDK pjeskovito tlo	0-0,5	0-60	-	-	0-30	0-50	0-60
MDK Praškasto - ilovasto tlo	0,5-1	60-90	-	-	30-50	50-100	60-150
MDK glinasto tlo	1-2	90-120	-	-	50-75	100-150	150-200

Tablica 4. Stupnjevi onečišćenja za pojedine teške metale prikazani po postajama. S jednom zvjezdicom označene su vrijednosti koje predstavljaju zemljište povećane onečišćenosti (So: 25-50 %), s dvije zvjezdice zemljište velike onečišćenosti (So: 50-100 %), s tri zvjezdice onečišćeno zemljište (So: 100-200 %) i s četiri zvjezdice zagađeno zemljište (So: >200 %) (NN 09/14).

Postaja	So (%) Cd	So (%) Cu	So (%) Ni	So (%) Pb	So (%) Zn
2	74**	64**	129***	128***	249****
8	50*	41*	64**	101***	93**
10	96**	55**	114***	253****	168***
14	226****	63**	144***	311****	258****

3.2. Vrijednosti teških metala u samoniklim biljkama

Vrijednosti teških metala u samoniklim biljkama te fitoakumulacijski faktori za pojedine teške metale i biljne vrste prikazani su u Tablicama 5 – 11. Tamo gdje su uzorci istih vrsta sakupljeni na dvije i više postaja, kao što je to

slučaj s maslačkom, uskolisnim trputcem, bijelom djetelinom i višegodišnjim ljuljem, izračunata je srednja vrijednost ili prosjek. Radi preglednosti dobivenih rezultata u tablicama su debljim fontom istaknute tri najviše vrijednosti pojedinih teških metala kod ispitivanih biljnih vrsta. Isto tako su posebno istaknute tri najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora.

Tablica 5. Vrijednosti bakra u samoniklim biljkama (stupci 2-5) sa srednjom vrijednošću (stupac 6) i fitoakumulacijski faktori samoniklih biljaka za bakar (stupci 7-10) sa srednjom vrijednošću (stupac 11). Debljim fontom istaknute su tri najviše vrijednosti akumulacije teških metala u ispitivanim biljkama i tri najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora.

Vrste / Postaje	Bakar - Cu (mg/kg)				Prosjeak	Fitoakumulacijski faktori za Cu				Prosjeak
	2	8	10	14		2	8	10	14	
<i>Taraxacum officinale</i>	15,3	13,0	18,8	12,3	14,8	0,40	0,52	0,57	0,33	0,46
<i>Plantago lanceolata</i>	8,6	9,3	7,6	7,1	8,2	0,22	0,38	0,23	0,19	0,26
<i>Trifolium repens</i>	16,6	17,7	18,4	17,7	17,6	0,43	0,71	0,56	0,47	0,54
<i>Lolium perenne</i>	5,9			6,6	6,2	0,15			0,18	0,17
<i>Cichorium intybus</i>				31,3					0,83	
<i>Trifolium pratense</i>				14,1					0,38	
<i>Rumex thyrsoiflorus</i>			10,3					0,31		
<i>Plantago major</i>				12,0					0,32	
<i>Urtica dioica</i>				11,6					0,31	
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>		24,3					0,98			
<i>Erigeron annuus</i>				19,0					0,50	

Tablica 6. Vrijednosti cinka u samoniklim biljkama (stupci 2-5) sa srednjom vrijednošću (stupac 6) i fitoakumulacijski faktori samoniklih biljaka za cink (stupci 7-10) sa srednjom vrijednošću (stupac 11). Debljim fontom istaknute su tri najviše vrijednosti akumulacije teških metala u ispitivanim biljkama i tri najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora.

Vrste / Postaje	Cink - Zn (mg/kg)				Prosjeak	Fitoakumulacijski faktori za Zn				Prosjeak
	2	8	10	14		2	8	10	14	
<i>Taraxacum officinale</i>	87,5	94,8	117,7	85,7	96,4	0,59	1,70	1,17	0,55	1,00
<i>Plantago lanceolata</i>	101,6	70,0	73,7	186,5	108,0	0,68	1,25	0,73	1,20	0,97
<i>Trifolium repens</i>	91,7	91,0	42,7	64,5	72,5	0,62	1,63	0,42	0,42	0,77
<i>Lolium perenne</i>	33,1			39,2	36,2	0,22			0,25	0,24
<i>Cichorium intybus</i>				68,3					0,44	
<i>Trifolium pratense</i>				35,0					0,23	
<i>Rumex thyrsoiflorus</i>			43,2					0,43		
<i>Plantago major</i>				42,6					0,27	
<i>Urtica dioica</i>				27,1					0,18	
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>		145,8					2,61			
<i>Erigeron annuus</i>				46,4					0,30	

Vrijednosti bakra izmjerene u biljkama kreću se u rasponu od 5,9 do 31,3 mg/kg s time da najveću sposobnost fitoakumulacije bakra pokazuje cikorija s 31,3 mg/kg, a slijede ambrozija s 24,3 mg/kg i jednogodišnja krasolika s 19,0 mg/kg (Tablica 5). Najveće vrijednosti fitoakumulacijskih faktora za bakar imaju: ambrozija (0,98), cikorija (0,83) i bijela djetelina (0,54) (srednja vrijednost).

Vrijednosti cinka izmjerene u biljkama kreću se u rasponu od 27,1 do 186,5 mg/kg s time da najveću sposobnost fitoakumulacije cinka pokazuje ambrozija sa 145,8 mg/kg, a slijede uskolisni trputac sa 108,0 mg/kg (srednja vrijednost) i maslačak s 96,4 mg/kg (srednja

vrijednost) (Tablica 6). Najveće vrijednosti fitoakumulacijskih faktora za cink imaju: ambrozija (2,61), maslačak (1,00) (srednja vrijednost) i uskolisni trputac (0,97) (srednja vrijednost).

Vrijednosti kadmija izmjerene u biljkama kreću se u rasponu od 0,01 do 0,62 mg/kg s time da najveću sposobnost fitoakumulacije kadmija pokazuje maslačak s 0,41 mg/kg (srednja vrijednost), slijedi cikorija s 0,32 mg/kg i uskolisni trputac s 0,25 mg/kg (srednja vrijednost) (Tablica 7). Najveće vrijednosti fitoakumulacijskih faktora za kadmij pokazuje maslačak (1,04) (srednja vrijednost), ambrozija (0,68) i uskolisni trputac (0,59) (srednja vrijednost).

Tablica 7. Vrijednosti kadmija u samoniklim biljkama (stupci 2-5) sa srednjom vrijednošću (stupac 6) i fitoakumulacijski faktori samoniklih biljaka za kadmij (stupci 7-10) sa srednjom vrijednošću (stupac 11). Debljim fontom istaknute su tri najviše vrijednosti akumulacije teških metala u ispitivanim biljkama i tri najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora.

Vrste / Postaje	Kadmij – Cd (mg/kg)					Fitoakumulacijski faktori za Cd				
	2	8	10	14	Prosjeck	2	8	10	14	Prosjeck
<i>Taraxacum officinale</i>	0,62	0,37	0,36	0,29	0,41	1,66	1,49	0,76	0,26	1,04
<i>Plantago lanceolata</i>	0,31	0,16	0,35	0,17	0,25	0,84	0,65	0,73	0,15	0,59
<i>Trifolium repens</i>	0,04	0,03	0,04	0,01	0,03	0,11	0,10	0,09	0,01	0,08
<i>Lolium perenne</i>	0,03			0,03	0,03	0,07			0,02	0,05
<i>Cichorium intybus</i>				0,32					0,29	
<i>Trifolium pratense</i>				0,03					0,03	
<i>Rumex thyrsiflorus</i>			0,11					0,24		
<i>Plantago major</i>				0,07					0,06	
<i>Urtica dioica</i>				0,02					0,02	
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>		0,17					0,68			
<i>Erigeron annuus</i>				0,08					0,07	

Tablica 8. Vrijednosti mangana u samoniklim biljkama (stupci 2-5) sa srednjom vrijednošću (stupac 6) i fitoakumulacijski faktori samoniklih biljaka za mangan (stupci 7-10) sa srednjom vrijednošću (stupac 11). Debljim fontom istaknute su tri najviše vrijednosti akumulacije teških metala u ispitivanim biljkama i tri najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora.

Vrste / Postaje	Mangan - Mn (mg/kg)					Fitoakumulacijski faktori za Mn				
	2	8	10	14	Prosjeck	2	8	10	14	Prosjeck
<i>Taraxacum officinale</i>	22	30	36	50	34	0,041	0,076	0,080	0,124	0,080
<i>Plantago lanceolata</i>	21	23	29	27	25	0,039	0,058	0,065	0,068	0,058
<i>Trifolium repens</i>	21	22	30	31	26	0,039	0,055	0,067	0,077	0,060
<i>Lolium perenne</i>	16			22	19	0,029			0,056	0,043
<i>Cichorium intybus</i>				62					0,155	
<i>Trifolium pratense</i>				30					0,076	
<i>Rumex thyrsiflorus</i>			43					0,097		
<i>Plantago major</i>				20					0,051	
<i>Urtica dioica</i>				43					0,109	
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>		38					0,095			
<i>Erigeron annuus</i>				30					0,074	

Vrijednosti mangana izmjerene u biljkama kreću se u rasponu od 16 do 62 mg/kg s time da najveću sposobnost fitoakumulacije mangana pokazuje cikorija sa 62 mg/kg nakon koje slijede koprija s 43 mg/kg i kiselica s 43 mg/kg (Tablica 8). Najveće vrijednosti fitoakumulacijskih faktora za mangan imaju: cikorija (0,16), koprija (0,109) i kiselica (0,097).

Vrijednosti nikla izmjerene u biljkama kreću se u rasponu od 0,1 do 2,7 mg/kg s time da najveću sposobnost fitoakumulacije nikla pokazuje ambrozija s 2,7 mg/kg, a slijede maslačak s 1,6 mg/kg (srednja vrijednost) i cikorija s 0,9 mg/kg (Tablica 9). Najveće vrijednosti

fitoakumulacijskih faktora za nikal imaju: ambrozija (0,141), maslačak (0,058) (srednja vrijednost) i bijela djetelina (0,026) (srednja vrijednost).

Vrijednosti olova izmjerene u biljkama kreću se u rasponu od 0,08 do 0,97 mg/kg s time da najveću sposobnost fitoakumulacije olova pokazuje jednogodišnja krasolika s 0,97 mg/kg, a slijede uskolisni trputac s 0,63 mg/kg (srednja vrijednost) i bijela djetelina s 0,42 mg/kg (srednja vrijednost) (Tablica 10). Najveće vrijednosti fitoakumulacijskih faktora za olovo imaju: uskolisni trputac (0,0069) (srednja vrijednost), jednogodišnja krasolika (0,0062) i ambrozija (0,0060).

Tablica 9. Vrijednosti nikla u samoniklim biljkama (stupci 2-5) sa srednjom vrijednošću (stupac 6) i fitoakumulacijski faktori samoniklih biljaka za nikal (stupci 7-10) sa srednjom vrijednošću (stupac 11). Debljim fontom istaknute su tri najviše vrijednosti akumulacije teških metala u ispitivanim biljkama i tri najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora.

Vrste / Postaje	Nikal - Ni (mg/kg)				Prosjeak	Fitoakumulacijski faktori za Ni				Prosjeak
	2	8	10	14		2	8	10	14	
<i>Taraxacum officinale</i>	0,5	1,7	2,4		1,6	0,014	0,090	0,071		0,058
<i>Plantago lanceolata</i>	0,4	0,8	0,8	0,6	0,7	0,010	0,044	0,024	0,013	0,023
<i>Trifolium repens</i>	0,7	0,9	0,8	0,7	0,8	0,018	0,045	0,023	0,016	0,026
<i>Lolium perenne</i>	0,4			0,5	0,4	0,011			0,011	0,011
<i>Cichorium intybus</i>				0,9					0,021	
<i>Trifolium pratense</i>				0,1					0,001	
<i>Rumex thyrsoiflorus</i>			0,4					0,011		
<i>Plantago major</i>				0,1					0,003	
<i>Urtica dioica</i>				0,1					0,002	
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>		2,7					0,141			
<i>Erigeron annuus</i>				-					-	

Tablica 10. Vrijednosti olova u samoniklim biljkama (stupci 2-5) sa srednjom vrijednošću (stupac 6) i fitoakumulacijski faktori samoniklih biljaka za olovo (stupci 7-10) sa srednjom vrijednošću (stupac 11). Debljim fontom istaknute su tri najviše vrijednosti akumulacije teških metala u ispitivanim biljkama i tri najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora.

Vrste / Postaje	Olovo - Pb (mg/kg)				Prosjeak	Fitoakumulacijski faktori za Pb				Prosjeak
	2	8	10	14		2	8	10	14	
<i>Taraxacum officinale</i>	0,12	0,12	0,89	0,08	0,30	0,0018	0,0024	0,0070	0,0005	0,0029
<i>Plantago lanceolata</i>	0,58	0,39	0,83	0,70	0,63	0,0090	0,0076	0,0066	0,0045	0,0069
<i>Trifolium repens</i>	0,94	0,26	0,25	0,23	0,42	0,0147	0,0052	0,0020	0,0015	0,0059
<i>Lolium perenne</i>	0,35			0,36	0,36	0,0055			0,0023	0,0039
<i>Cichorium intybus</i>				0,14					0,0009	
<i>Trifolium pratense</i>				-					-	-
<i>Rumex thyrsoiflorus</i>			0,29					0,0023		
<i>Plantago major</i>				0,40					0,0026	
<i>Urtica dioica</i>				0,34					0,0022	
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>		0,31					0,0060			
<i>Erigeron annuus</i>				0,97					0,0062	

Vrijednosti željeza izmjerene u biljkama kreću se u rasponu od 81 do 161 mg/kg s time da najveću sposobnost fitoakumulacije željeza pokazuje ambrozija sa 154 mg/kg nakon koje slijede bijela djetelina sa 140 mg/kg (srednja vrijednost) i trputac sa 125 mg/kg (srednja vrijednost) (Tablica 11). Najveće vrijednosti fitoakumulacijskih faktora za željezo imaju: ambrozija (0,0061), jednogodišnja krasolika (0,0059) i bijela djetelina (0,0057) (srednja vrijednost).

U prethodnim opisima, kod onih biljnih vrsta gdje postoji više uzoraka navedena je srednja vrijednost, a kod onih gdje postoji samo jedan uzorak navedena je izmjerena vrijednost.

Od 11 istraživanih samoniklih biljnih vrsta najveću sposobnost fitoakumulacije teških metala pokazale su: za bakar - cikorija s 31,3 mg/kg, za cink - ambrozija sa 145,8 mg/kg, za kadmij - maslačak s 0,41 mg/kg, za mangan -

cikorija sa 62 mg/kg, za nikal - ambrozija s 2,7 mg/kg, za olovo - jednogodišnja krasolika s 0,97 mg/kg i za željezo - ambrozija sa 154 mg/kg. Pojedine vrste, kao ambrozija i cikorija, pokazuju znatnu sposobnost akumulacije većeg broja teških metala. Ujedno treba naglasiti da za biljne vrste gdje postoji samo jedan uzorak, vrijednosti su samo indikativne.

Zanimljivo je također da sve vrste koje su se u ovim istraživanjima pokazale kao najbolji fitoakumulatori teških metala spadaju u botaničku skupinu glavočika (*Compositae*), dok se u literaturi kao najbolji fitoakumulatori teških metala spominju biljke iz porodice krstašica (*Brassicaceae*) (Kramer 2010). Međutim, krstašice nisu obuhvaćene ovim istraživanjima jer nisu tako česte na zelenim gradskim površinama, a one koje i rastu nisu posebno brojne i time pogodne za eventualnu primjenu kao fitoremedijatori.

Tablica 11. Vrijednosti željeza u samoniklim biljkama (stupci 2-5) sa srednjom vrijednošću (stupac 6) i fitoakumulacijski faktori samoniklih biljaka za željezo (stupci 7-10) sa srednjom vrijednošću (stupac 11). Debljim fontom istaknute su tri najviše vrijednosti akumulacije teških metala u ispitivanim biljkama i tri najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora.

Vrste / Postaje	Željezo - Fe (mg/kg)					Fitoakumulacijski faktori za Fe				
	2	8	10	14	Prosjek	2	8	10	14	Prosjek
<i>Taraxacum officinale</i>	113	122	110	127	118	0,0043	0,0048	0,0040	0,0062	0,0048
<i>Plantago lanceolata</i>	96	161	123	121	125	0,0036	0,0064	0,0044	0,0059	0,0051
<i>Trifolium repens</i>	121	158	131	151	140	0,0046	0,0063	0,0047	0,0073	0,0057
<i>Lolium perenne</i>	82			93	88	0,0031			0,0046	0,0039
<i>Cichorium intybus</i>				109					0,0053	
<i>Trifolium pratense</i>				81					0,0040	
<i>Rumex thyrsoiflorus</i>			88					0,0032		
<i>Plantago major</i>				91					0,0045	
<i>Urtica dioica</i>				86					0,0042	
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>		154					0,0061			
<i>Erigeron annuus</i>				122					0,0059	

Upotreba samoniklih biljaka u fitoremedijaciji ima i dodatnu prednost smanjivanja troškova pripreme zemljišta, sijanja ili sadnje biljaka fitoakumulatora te njihovo održavanje na onečišćenim površinama kroz određeno vrijeme. Ideja ovoga rada je da se na onečišćenim površinama iskoriste već postojeće samonikle vrste odnosno da se određenim načinom održavanja stvore ekološki uvjeti za opstanak biljnih vrsta koje su sposobne premještati teške metale iz tla u nadzemne dijelove biljaka. Postupak fitoremedijacije trebao bi uključivati košnju biljaka, sušenje i uklanjanje otkosa, a potom spaljivanje otkosa. Sušenje otkosa i kasnije spaljivanje trebali bi imati za cilj da se smanji masa i volumen konačnog otpada. Pepeo koji sadrži velike količine teških metala trebalo bi adekvatno deponirati.

Kao što je već istaknuto različite samonikle vrste rastu na različitim tipovima staništa. Najbrojnija staništa u gradovima su zelene površine uz prometnice, u parkovima, oko zgrada, na dvorištima i sličnim mjestima, koje se redovito kose. Na takvim mjestima, među istraživanim biljkama, najčešće rastu maslačak, uskolisni trputac, bijela djetelina i višegodišnji ljulj, a nešto rjeđe crvena djetelina, cikorijska, kiselica i veliki trputac, a mjestimično s manjim brojem primjeraka ambrozija i jednogodišnja krasolika. Dakle, u primjeni samoniklih biljaka u fitoremedijaciji, osim same sposobnosti akumulacije teških metala treba uzimati u obzir i činjenicu koje vrste su česte i na kojim tipovima staništa. Na primjer, u fitoremedijaciji teških metala s velikih površina zelenih gradskih travnjaka ili tzv. tratina važnu ulogu mogu imati maslačak, uskolisni trputac, bijela djetelina i višegodišnji ljulj. Za održavanje navedenog tipa staništa potrebna je redovita košnja.

Jednogodišnje biljke ili tzv. terofiti u koje se ubraja ambrozija i jednogodišnja krasolika također su u ovim istraživanjima pokazale dobre fitoakumulacijske sposobnosti teških metala. Međutim, navedene biljke u većem broju rastu na specifičnim staništima. To su površine gdje je prethodno odstranjen biljni pokrov, čime je nastala gola površina tla pogodna za razvoj

jednogodišnjih biljaka koje stvaraju velike količine sjemena i koje se brzo razvijaju tijekom jedne vegetacijske sezone. Takve površine nastaju nakon građevinskih radova, prestankom obrade poljoprivrednog zemljišta ili nakon žetve na strništima. Upotreba navedenih vrsta u fitoremedijaciji je moguća samo jednokratno i to na staništima gdje takve biljke same niknu. Budući da su i ambrozija i jednogodišnja krasolika strane invazivne vrste u Hrvatskoj (Boršić *et al.* 2008) sa stanovišta zaštite prirode nije preporučljivo takve vrste sijati.

Upotreba zavičajnih samoniklih biljaka u fitoremedijaciji ima još jednu prednost, a to je da one ne predstavljaju prijetnju za okoliš i biološku raznolikost nekog područja, što je u literaturi poznato i opisano pod pojmom „Biodiversity prospecting“ (Prasad & Freitas 2003).

U literaturi postoje brojna istraživanja fitoakumulacije teških metala kod samoniklih biljaka. Npr. Malizia *et al.* (2012) su istraživali mogućnost fitoakumulacije teških metala (Cu, Cr, Pb, Pd, Mn i Zn) uz pomoć čestih biljnih vrsta (*Plantago major*, *Taraxacum officinale*, *Trifolium pratense* i *Urtica dioica*) na pet postaja uz više ili manje prometne ceste na području grada Rima. Ovi su autori pronašli da su se vrijednosti teških metala u lišću maslačka u ljetnim mjesecima na području Rima za bakar kretale u rasponu od 24 do 51 mg/kg, za cink u rasponu od 80 do 150 mg/kg, za mangan u rasponu od 35 do 59 mg/kg, za olovo u rasponu od 4 do 28 mg/kg; dok su u Varaždinu za bakar izmjerene vrijednosti u rasponu od 12,3 do 18,8 mg/kg (Tablica 5), za cink u rasponu od 85,7 do 117,7 mg/kg (Tablica 6), za mangan u rasponu od 22 do 50 mg/kg (Tablica 8), za olovo u rasponu od 0,08 do 0,89 mg/kg (Tablica 10); što upućuje na zaključak da je lišće maslačka na području grada Rima u prosjeku akumuliralo više teških metala u odnosu na nadzemne dijelove maslačka u Varaždinu. Vrijednosti teških metala u lišću crvene djeteline u ljetnim mjesecima na području Rima za bakar izmjerene su u rasponu od 16 do 82 mg/kg, za cink u rasponu od 30 do 51 mg/kg, za mangan u rasponu od 25

do 45 mg/kg, za olovo u rasponu od 4 do 12 mg/kg; dok je u Varaždinu sa samo jedne lokacije u nadzemnim dijelovima crvene djeteline izmjereno 14,1 mg/kg bakra, 35,0 mg/kg cinka i 30 mg/kg mangana, dok je koncentracija olova bila ispod detekcijskog limita instrumenta (Tablice 5, 6, 8 i 10); što upućuje na zaključak da je i lišće crvene djeteline na području grada Rima akumuliralo više teških metala u odnosu na nadzemne dijelove crvene djeteline u Varaždinu. Vrijednosti teških metala u lišću velikog trputca u ljetnim mjesecima na području Rima za bakar izmjerene su u rasponu od 18 do 60 mg/kg, za cink u rasponu od 51 do 95 mg/kg, za mangan u rasponu od 23 do 84 mg/kg, za olovo su na svim lokacijama vrijednosti bile ispod detekcijskog limita osim na jednoj, na kojoj je izmjereno 11 mg/kg; dok je u Varaždinu sa samo jedne lokacije u nadzemnim dijelovima velikog trputca izmjereno 12,0 mg/kg bakra, 42,6 mg/kg cinka, 20 mg/kg mangana i 0,4 mg/kg olova (Tablice 5, 6, 8 i 10); što upućuje na zaključak da je lišće velikog trputca na području grada Rima akumuliralo više teških metala u odnosu na nadzemne dijelove velikog trputca u Varaždinu. Vrijednosti teških metala u lišću koprive u ljetnim mjesecima na području Rima za bakar izmjerene su u rasponu od 15 do 41 mg/kg, za cink u rasponu od 65 do 128 mg/kg, za mangan u rasponu od 29 do 77 mg/kg, za olovo u rasponu od 10 do 23 mg/kg; dok je u Varaždinu sa samo jedne lokacije u nadzemnim dijelovima koprive izmjereno 11,6 mg/kg bakra, 27,1 mg/kg cinka, 43 mg/kg mangana i 0,34 mg/kg olova (Tablice 5, 6, 8 i 10); što upućuje na zaključak da je lišće koprive na području grada Rima akumuliralo više teških metala u odnosu na lišće koprive u Varaždinu. Prosječne vrijednosti fitoakumulacijskih faktora koje su dobili talijanski autori za akumulaciju teških metala pomoću lišća maslačka u ljetnim mjesecima iznose za bakar - 0,373, za cink - 0,269, za mangan 0,081 te za olovo - 0,042. Prosječne vrijednosti fitoakumulacijskih faktora dobivenih u okviru ovog istraživanja pomoću maslačka iznose za bakar - 0,46, za cink - 1,00, za mangan - 0,080 te za olovo - 0,0029 (Tablice 5, 6, 8 i 10). Usporedbom ovih vrijednosti vidljivo je da maslačak ima veće fitoakumulacijske faktore za bakar i cink, gotovo iste za mangan te manje za olovo u Varaždinu, u odnosu na Rim. Prosječne vrijednosti fitoakumulacijskih faktora koje su dobili talijanski autori za akumulaciju teških metala pomoću crvene djeteline u ljetnim mjesecima iznose za bakar - 0,429, za cink - 0,109, za mangan - 0,060 te za olovo - 0,028. Vrijednosti fitoakumulacijskih faktora dobivenih u okviru ovog istraživanja pomoću crvene djeteline iznose za bakar - 0,38, za cink - 0,23, za mangan - 0,076 dok je vrijednost olova i na toj lokaciji bila ispod detekcijskog limita pa nije bilo moguće odrediti fitoakumulacijski faktor (Tablice 5, 6, 8 i 10). Usporedbom ovih vrijednosti vidljivo je da crvena djetelina ima manje fitoakumulacijske faktore za bakar te veće za cink i mangan u Varaždinu, u odnosu na Rim. Prosječne vrijednosti fitoakumulacijskih faktora koje su dobili talijanski autori za akumulaciju teških metala pomoću velikog trputca u ljetnim mjesecima iznose za bakar - 0,390, za cink - 0,282, za mangan - 0,082 te za olovo - 0,016 (jedna vrijednost). Vrijednosti fitoakumulacijskih faktora dobivenih u okviru ovog istraživanja pomoću nadzemnih dijelova velikog trputca

iznose za bakar - 0,32, za cink - 0,27, za mangan - 0,051 te za olovo - 0,0026 (Tablice 5, 6, 8 i 10). Usporedbom ovih vrijednosti vidljivo je da veliki trputac ima manje vrijednosti fitoakumulacijskih faktora za bakar, mangan i olovo te vrlo slične za cink u Varaždinu, u odnosu na Rim. Prosječne vrijednosti fitoakumulacijskih faktora koje su dobili talijanski autori za akumulaciju teških metala pomoću koprive u ljetnim mjesecima iznose za bakar - 0,197, za cink - 0,313, za mangan - 0,100 te za olovo - 0,039. Vrijednosti fitoakumulacijskih faktora dobivenih u okviru ovog istraživanja pomoću nadzemnih dijelova koprive iznose za bakar - 0,31, za cink - 0,18, za mangan - 0,109 te za olovo - 0,0022 (Tablice 5, 6, 8 i 10). Usporedbom ovih vrijednosti vidljivo je da kopriva ima veće fitoakumulacijske faktore za bakar, manje za cink i olovo te gotovo identične za mangan u Varaždinu, u odnosu na Rim.

U susjednoj Sloveniji, na području Celja, na 30 lokacija, ispitivana je sposobnost akumulacije Pb i Zn od strane uskolisnog trputca (*Platago lenceolata*) (Leštan et al. 2003). Pronađeno je da udio olova koji je dostupan biljkama iznosi od 0 do 1,68 %, dok za cink taj udio iznosi od 0 do 40,8 %. Isto tako, ovi autori su objavili da je od količina cinka i olova koje su dostupne biljkama za akumulaciju, lišće uskolisnog trputca (*Platago lenceolata*) akumuliralo od 43 do 609 mg/kg cinka odnosno 0,7 do 13,5 mg/kg olova; dok su u Varaždinu za cink izmjerene vrijednosti u rasponu od 70,0 do 186,5 mg/kg (Tablica 6), a za olovo u rasponu od 0,39 do 0,83 mg/kg (Tablica 10); što upućuje na zaključak da je lišće uskolisnog trputca na području Celja u prosjeku akumuliralo više cinka i olova u odnosu na nadzemne dijelove uskolisnog trputca u Varaždinu. Prosječne vrijednosti fitoakumulacijskih faktora koje su dobili slovenski autori za uskolisni trputac iznose za cink - 0,209, a za olovo - 0,014. Vrijednosti fitoakumulacijskih faktora dobivenih u okviru ovog istraživanja pomoću uskolisnog trputca iznose za cink - 0,970, a za olovo - 0,0069 (Tablice 6 i 10). Usporedbom ovih vrijednosti vidljivo je da uskolisni trputac ima veće fitoakumulacijske faktore za cink te manje za olovo u Varaždinu, u odnosu na Celje.

U susjednoj Bosni i Hercegovini je također provedeno istraživanje fitoakumulacijskih sposobnosti maslačka (*Taraxacum officinale*) za olovo, kadmij i cink na šest lokaliteta neposredno uz prometnice i šest kontrolnih lokaliteta (Šaćiragić-Borić 2012). Autorica je pronašla da su se vrijednosti teških metala u lišću maslačka na ispitivanim lokacijama u Bosni i Hercegovini za cink kretale u rasponu od 23,5 do 61,6 mg/kg, za kadmij u rasponu od 0,29 do 0,75 mg/kg te za olovo u rasponu od 0,45 do 14,2 mg/kg; dok su u Varaždinu za cink izmjerene vrijednosti u rasponu od 85,7 do 117,7 mg/kg (Tablica 6), za kadmij u rasponu od 0,29 do 0,62 mg/kg (Tablica 7), a za olovo u rasponu od 0,08 do 0,89 mg/kg (Tablica 10); što upućuje na zaključak da je lišće maslačka na području Bosne i Hercegovine u prosjeku akumuliralo manje cinka, a više kadmija i olova u odnosu na nadzemne dijelove maslačka u Varaždinu. S obzirom da autorica nije prikazala vrijednosti ispitivanih teških metala u tlu na istraživanim lokacijama, nije bilo moguće izračunati fitoakumulacijske faktore te usporediti s dobivenim fitoakumulacijskim faktorima maslačka za cink, kadmij i olovo u Varaždinu.

4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada ispitivana je sposobnost akumulacije teških metala kod 11 vrsta čestih samoniklih biljnih vrsta na četiri lokacije na području grada Varaždina. Ustanovljeno je da najveću sposobnost akumulacije bakra pokazuje cikorija (*Cichorium intybus*) s 31,3 mg/kg, cinka ambrozija (*Ambrosia artemisiifolia*) sa 145,8 mg/kg, kadmija maslačak (*Taraxacum officinale*) s 0,41 mg/kg, mangana cikorija (*Cichorium intybus*) sa 62 mg/kg, nikla ambrozija (*Ambrosia artemisiifolia*) s 2,7 mg/kg, olova jednogodišnja krasolika (*Erigeron annuus*) s 0,97 mg/kg i željeza ambrozija (*Ambrosia artemisiifolia*) sa 154 mg/kg.

Najviše vrijednosti fitoakumulacijskih faktora pokazuju: za bakar ambrozija (0,98), za cink ambrozija (2,61), za kadmij maslačak (1,04), za mangan cikorija (0,16), za nikal ambrozija (0,14), za olovo uskolisni trputac (0,0069) i za željezo ambrozija (0,0061). Potrebno je naglasiti da su rezultati kod onih biljnih vrsta gdje je provedena analiza za samo jedan uzorak tla i biljnog materijala isključivo indikativni.

Dobivene vrijednosti akumulacije pojedinih teških metala od strane određenih biljnih vrsta, kao i izračuni fitoakumulacijskih faktora, mogu biti korisni kod provođenja fitoremedijacije onečišćenih površina na području kontinentalne Hrvatske, ali i šire u regiji na područjima sa sličnim klimatskim uvjetima.

Kod primjene samoniklih biljnih vrsta u sanaciji tala onečišćenih teškim metalima trebalo bi voditi računa o tome koje biljne vrste rastu na kojim tipovima staništa te o načinu održavanja takvih staništa. Na primjer, na zelenim gradskim površinama koje čine najčešći tip staništa u urbanim područjima od ispitivanih vrsta za fitoremedijaciju najpogodnije su: maslačak, uskolisni trputac, bijela djetelina i višegodišnji ljulj. Za održavanje navedenih vrsta na spomenutom tipu staništa neophodna je česta košnja. Također treba istaknuti da se u remedijaciji ne bi smjele koristiti strane invazivne vrste, poput ambrozije i jednogodišnje krasolike, osim na mjestima gdje su one same već prisutne.

5. ZAHVALA

Ovim putem zahvaljujemo Varaždinskoj županiji na financiranju projekta „Uklanjanje teških metala fitoremedijacijom na području Varaždina i okolice“ čiji su rezultati prezentirani u ovome radu. Također zahvaljujemo recenzenticama koje su svojim primjedbama uvelike pomogle da se poboljša ovaj rad.

6. LITERATURA

Adriano DC (2001) Trace Elements in Terrestrial Environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. 2nd Edition, Springer Science, New York

Ali H, Khan E, Sayad MA (2013) Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications. Chemosphere 91:869-881

Boršić I, Milović M, Dujmović I, Bogdanović S, Cigić P, Rešetnik I, Nikolić T, Mitić B (2008) Preliminary

check-list of invasive alien plant species (IAS) in Croatia. Nat Croat 17:55-71

Brooks RR (ed) (1998) Plants that hyperaccumulate heavy metals. CAB International, Wallingford

FAO (2006) Guidelines for soil description, 4th Edition, FAO, UN, Rome

Halamić J, Miko S (2009) Geokemijski atlas Republike Hrvatske. Hrvatski geološki institut, Zagreb

Hooda V (2007) Phytoremediation of toxic metals from soil and waste water. J Environ Biol 28:367-376

Hrgarek M, Ernoić K, Pilipović Lj, Zorić Z, Šarić I, Balić D, Zagorščak M (2006) Studija izbora potencijalnih lokacija za praćenje kakvoće zraka na području grada Varaždina. EKO-MONITORING d.o.o., Varaždin

HRN ISO 10390:2004 Kakvoća tla - Određivanje pH vrijednosti u 0,01 M CaCl₂, 1 M KCl i H₂O u omjeru 1:2.5 (m/v)

HRN ISO 11277:2011 Kvaliteta tla - Određivanje raspodjele veličine čestica (mehaničkog sastava) u mineralnom dijelu tla - Metoda prosijavanja i sedimentacije (ISO 11277:2009)

HRN ISO 11464:2004 Priprema uzoraka tla za fizikalne i kemijske analize

HRN ISO 11466:2004 Kakvoća tla-Ekstrakcija elemenata topljivih u zlatotopci (ISO 11466:1995)

Kisić I (2012) Sanacija onečišćenog tla. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

Kramer U (2010) Metal hyperaccumulation in plants. Annu Rev Plant Biol 61:517-534

Leštan D, Grčman H, Zupan M, Bačac N (2003) Relationship of Soil Properties to Fractionation of Pb and Zn in Soil and their Uptake into Plantago lanceolata. Soil Sediment Contam 12:507-522

Malizia D, Giuliano A, Ortaggi G, Masotti A (2012) Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. Chem Cent J 6 (Suppl 2):S6

Marković T (2003) Istraživanje pokretljivosti onečišćivača u pokrovnim naslagama krškog karbonatnog vodonosnika na području izvora Turanjsko jezero u Vranskom polju. Doktorska disertacija. Rudarsko-geloško-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

Marschner H (2003) Mineral Nutrition of higher Plants. Academic Press, Amsterdam

Morel J-M, Echevarria G, Gonchareva N (2002) Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils. Springer, Dordrecht

Nedelkoska TV, Doran PM (2000) Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining. Miner Eng 13:549-561

Nowell LH, Capel PD, Dileanis PD (1999) Pesticides in stream sediment and aquatic biota-Distribution, trends, and governing factors. Lewis Publishers, Boca Raton

Padmavathamma PK, Loretta YL (2007) Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in plants. Water Air Soil Pollut 184:105-126

PerkinElmer (2000) Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrometry. PerkinElmer Bodenseewerk, Singapore

PHYTOREM (2013) Phytoremediation Reference Database. Environment Canada

Prasad MNV, Freitas HM (2003) Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for

phytoremediation technology. *Electron J Biotechnol* 6:285-321

Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja, Narodne novine 09/14

Rascio N, Navari-Izzo F (2011) Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Sci* 180:169-181

Sarma H (2011) Metal Hyperaccumulation in Plants: A Review Focusing on Phytoremediation Technology. *J Environ Sci Technol* 4:118-138

Sing OV, Labana S, Pandey G, Budhiraja R, Jain RK (2003) Phytoremediation: An Overview of Metallic Ion Decontamination from Soil. *Appl Microbiol Biot* 61:405-412

Stančić Z, Vujević D (2013) Izvješće projekta: Uklanjanje teških metala fitoremedijacijom na području Varaždina i okolice. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin

Suresh B, Ravishankar GA (2004) Phytoremediation-a novel and promising approach for environmental clean-up. *Crit Rev Biotechnol* 24:97-124

Šaćiragić-Borić S (2012) Uloga biljaka u „sakupljanju“ otpada u procesu fitoremedijacije. Zbornik radova. Naučno-stručni skup sa međunarodnim sudjelovanjem „Upravljanje animalnim otpadom i održivi razvoj“ Sarajevo, Bosna i Hercegovina: 26. lipnja 2011. str. 139-153

Škorić A. (1982) Priručnik za pedološka istraživanja. Fakultet poljoprivrednih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

U.S. EPA (2000) Bioaccumulation Testing and Interpretation for the Purpose of Sediment Quality Assessment. U.S. Environmental Protection Agency. Dostupno http://water.epa.gov/polwaste/sediments/cs/biotesting_index.cfm Citirano 20. siječnja 2014.

U.S. EPA (2014) Waste and Cleanup Risk Assessment Glossary. U.S. Environmental Protection Agency. Dostupno <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/glossary.htm> Citirano 20. siječnja 2014.

WHO (1997) Health and Environment in Sustainable Development. WHO, Geneva

Zwahlen F (ed) (2004) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report - COST Action 620. European Commission – Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg

MOGUĆNOSTI PONOVNE UPORABE VODE PRI PROIZVODNJI PROIZVODA NA BAZI BITUMENA

POSSIBILITIES OF WATER RECYCLING IN THE PRODUCTION OF BITUMEN BASED PRODUCTS

Dinko Vujević¹, Petra Strahija², Tito Todorović³, Mateja Novak³, Aleksandra Anić Vučinić¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za inženjerstvo okoliša, Hallerova aleja 7, HR-42000 Varaždin, HRVATSKA dvujevic@gfv.hr

² Međimurska županija, Upravni odjel za prostorno uređenje, gradnju i zaštitu okoliša, Ruđera Boškovića 2, HR-40000 Čakovec, HRVATSKA

³ Bitum d.o.o., Slavonska avenija 19, HR-10000 Zagreb, HRVATSKA

Sažetak: Voda je izvor života ali isto tako i važna sirovina u mnogim industrijskim procesima. S obzirom na ubrzani gospodarski razvoj i čovjekovo vrlo često neodgovorno ponašanje prema prirodi, zalihe prirodne čiste vode su u mnogim slučajevima ugrožene. Stoga je gospodarenje vodom značajan segment ljudskog napretka i blagostanja. Gledano s ekološkog aspekta, mogućnost uštede vode na bilo koji način veoma je poželjna u svim aspektima ljudskog djelovanja. Budući da industrijski sektor troši ogromne količine vode, vrlo je važno da industrije počnu shvaćati, da postoje mnoga moguća rješenja za uštedu vode. Prvenstveno se to odnosi na one industrije, u kojima nije najvažnija zdravstvena ispravnost vode, kao što je slučaj u proizvodnji proizvoda na bazi bitumena, građevinskim radovima, miješanju betona, uporabi vode kao rashladnog medija u elektranama... U ovom radu studirana je mogućnost ponovne uporabe otpadne vode pri proizvodnji proizvoda na bazi bitumena, u jednom postrojenju na području Sjeverozapadne Hrvatske. Poseban naglasak stavljen je na recikliranje i ponovnu uporabu vode te iznalaženje mogućih rješenja vezanih uz smanjenje potrošnje sirove vode kao i troškova odvodnje vode u proizvodnom ciklusu.

Cljučne riječi: recikliranje vode, ušteda vode, bitumen, proizvodi na bazi bitumena.

Abstract: Water is the essence of life, as well as an important raw material in many industrial processes. Due to rapid economic development and often irresponsible behaviour of mankind towards nature, in many cases the resources of clean water have been endangered. Therefore, water management is a significant part of human prospect and welfare. From the environmental point of view, the possibility of water savings in every field of human activity is very desirable. Since the industrial sector demands huge amounts of water, it is extremely important that industry adopts a concept of various water savings possibilities. This primarily applies to those industries, where health properties of water are not the most important issue, such as the case in manufacturing of bitumen based products, construction works, concrete preparation, the use of water as cooling fluid in power-plants... In this work the study of wastewater reuse in manufacturing of bitumen based products have been studied in one production plant in the North West region of Croatia. A special focus has been put on water reuse and findings of possible solutions regarding minimisation of the amount of fresh water usage, as well as the costs of water drainage in the production cycle.

Keywords: water recycling, water saving, bitumen, bitumen based products.

Received: 27.01.2014 / Accepted: 24.01.2015

Published online: 19.06.2015

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Voda je jedinstven i nezamjenjiv prirodni resurs ograničenih količina i neravnomjerne prostorne raspodjele. Svi oblici života i sve ljudske aktivnosti vezane su uz vodu i iz toga jasno proizlazi činjenica važnosti odnosa prema vodi. Gospodarski razvoj i urbanizacija dovode, s jedne strane do velikog porasta potreba za vodom, a s druge strane do ugrožavanja vodnih resursa i vodnog okoliša. Hrvatska se trenutno ubraja u skupinu vodom relativno bogatih zemalja u kojoj problemi s vodom i oko vode još nisu zaoštreni i vodni resursi nisu ograničavajući čimbenik razvoja. Voda kao energetski medij u industriji najčešće ima funkciju hlađenja, prijenosa i pranja. Voda za industrijsku primjenu mora biti prihvatljiva i s gospodarskog aspekta što podrazumijeva cijenu sirove vode, njenu dostupnost u potrebnoj količini i trošak pripreme. Stoga je voda iz komunalnih izvora, već pripremljena za piće i sanitarne

potrebe, preskupa za industrijsku namjenu. Prisutan je trend pripreme i recikliranja vode „na licu mjesta“ i njena ponovna upotreba. Za očekivati je da će zakoni vezani uz ispuštanje otpadnih voda, postajati sve rigorozniji te će zahtijevati djelotvornije i odgovornije raspolaganje vodom posebno prilikom njene upotrebe u industriji.

U okviru ovog rada studirana je mogućnost ponovne upotrebe vode u proizvodnji bitumenskih proizvoda na primjeru jedne tvornice za proizvodnju bitumenskih emulzija, masa i pasti za cestogradnju, locirane u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. Predloženo je moguće rješenje, u svrhu smanjenja potrošnje sirove vode i troškova odvodnje vode i to na način da bi se sakupljala voda koja se koristi u procesu hlađenja, spremala u poseban spremnik te ponovno koristila kao sirovina u proizvodnji. Također bi se koristila i oborinska voda koja bi se sakupljala s krovnih površina ovog postrojenja. S

obzirom na činjenicu da kišnica trenutačno odlazi u kanalizaciju, njenim sakupljanjem i upotrebom u procesu proizvodnje svakako bi se smanjio trošak sirove vode ali i odvodnje vode upotrebjene u procesu proizvodnje.

2. UŠTEDA VODE

Kako potreba za vodom neprestano raste, voda se prestano crpi, ponekad i prevozi na velike udaljenosti što zahtjeva utrošak velikih količina energije i drugih resursa. Najveći potrošači vode su industrijska postrojenja. Voda za tu namjenu ne mora biti i zdravstveno ispravna, kao što je slučaj kod vode za piće. Naime, u industriji se velike količine vode koriste u tehnološkim procesima kao rashladni medij. Radi uštede, smanjenja troškova i očuvanja prirodnih zaliha pitke vode, u takvim industrijama se može upotrebljavati, uvjetno rečeno, i voda „niže“ kvalitete, odnosno reciklirana voda (De Souza et al. 2011).

Pod pojmom recikliranje najčešće se misli na staklene boce, novine, papir, aluminijske limenke, ali isto tako se i voda može reciklirati. Recikliranje vode predstavlja ponovnu upotrebu otpadne vode u korisne svrhe kao što su navodnjavanje poljoprivrednih površina i parkova, upotreba u industrijskim procesima, ispiranje toaleta, navodnjavanje golf terena, kao rashladni medij u elektranama i rafinerijama nafte, građevinski radovi, miješanje betona, izgradnja umjetnih jezera... Recikliranjem vode ostvaruju se velike financijske uštede i čuvaju prirodne zalihe pitke vode. Određena vrsta otpadnih voda se može obraditi na način da zadovoljava kvalitetu vode za ponovnu upotrebu. Nisu zabilježeni slučajevi zdravstvenih problema kod ljudi zbog kontakta s recikliranom vodom koja je obrađena prema standardima, kriterijima i propisima (EPA 2012).

Voda se u nekim slučajevima može reciklirati i na licu mjesta. Najčešći tip reciklirane vode je voda koja je dobivena obradom komunalnih otpadnih voda i kanalizacije (EPA 2012). Prenamjena ili recikliranje otpadne vode ovisi o kvaliteti izvora otpadne vode, stupnju obrade otpadne vode te konačnoj namjeni odnosno zahtjevu za kvalitetom obrađene vode. Recikliranje vode ima veliku prednost za okoliš. Prenamjena vode osim što predstavlja dodatan izvor vode, može imati i veliku ulogu u smanjenju korištenja vode iz osjetljivih ekosustava. Ostale prednosti uključuju smanjenje količina ispuštenih otpadnih voda te sprječavanje onečišćenja. Reciklirane vode mogu se također koristiti za stvaranje novih ili poboljšanje već postojećih močvarnih te priobalnih staništa.

Kako potrebe za vodom rastu te se povećava svijest o zaštiti okoliša, recikliranje vode će imati sve veću ulogu i u vodoopskrbi na području Republike Hrvatske (EPA 2012). U cilju postizanja željene kvalitete, nužno je otpadne vode pravilno obraditi. Tehnološki gledano, danas je moguće otpadne vode obrađivati do bilo kojeg željenog stupnja pročišćavanja, no najveći problem je cijena. Stoga treba pronaći kompromis između željene kvalitete obrađene vode i cijene tehnološkog postupka. Treba imati na umu da recikliranje i ponovna upotreba vode nije besplatna, a cijenu određuje onaj koji će financirati proces recikliranja i kontrole kvalitete. Konačna cijena određuje

se prema stupnju kvalitete obrađene vode. Mora se voditi računa o tome da voda koja je reciklirana nema štetnog utjecaja na okoliš te da kvalitetom zadovoljava potrebe svoje namjene (Salgot 2006).

3. METODOLOGIJA

U ovom radu studirana je problematika vezana za mogućnost ponovne upotrebe vode pri proizvodnji bitumenskih proizvoda u jednom postrojenju za proizvodnju emulzija, masa i pastila za cestogradnju lociranoj na području sjeverozapadne Hrvatske gdje se prilikom proizvodnje emulzije za hlađenje brtvi koloidnog mlina koristi vodovodna voda koja nakon prolaska kroz brtve odlazi u kanalizaciju. Utrošak vode za hlađenje kreće se iznad 1 m³ po satu proizvodnje emulzije ili više od 1 m³ na 10 m³ emulzije. Osim toga, prije početka proizvodnje potrebno je zagrijati cjevovode pa se brtve moraju hladiti, a nakon završetka proizvodnje brtve se moraju hladiti dok unutrašnja temperatura mlina ne padne ispod 100 °C. Dakle, na proces hlađenja nevezano o proizvodnji potroši se preko 1 m³ vodovodne vode.

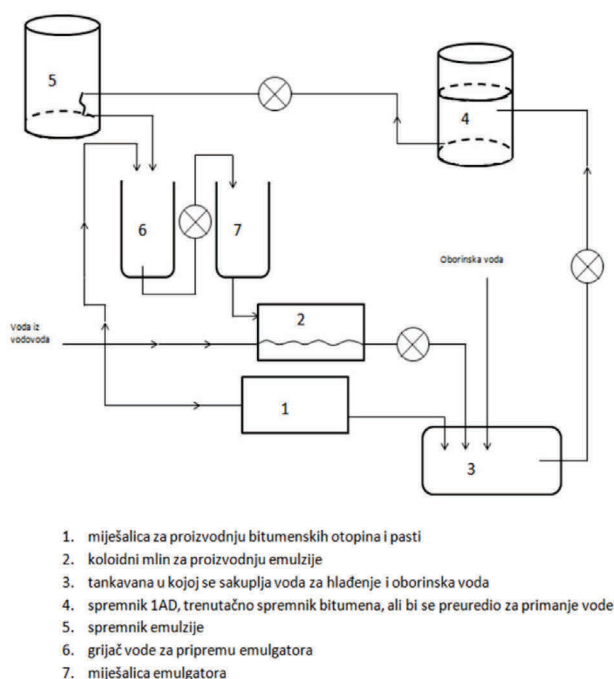
Osim za proizvodnju emulzije, voda se koristi za hlađenje i prilikom proizvodnje bitumenskih otopina u organskim otapalima i pri proizvodnji bitumenskih pastila (resitol). Utrošak vode za ove procese se kreće iznad 2 m³ po satu ili više od 2 m³ na 1 m³ proizvedenog resitola.

Nakon proizvodnog procesa voda iz vodovoda koja je korištena za hlađenje postrojenja odvodila bi se u posebni spremnik nakon čega bi se koristila u proizvodnji emulzije. Za hlađenje se također može koristiti i oborinska voda koja odlazi u kanalizaciju, čime bi se smanjili troškovi sirove vode i odvodnje. Sakupljanjem oborinskih voda dodatno bi se smanjila potreba za vodom iz vodovoda.

Analizirani su podaci iz 2010. godine. Ustanovljeno je da je u toj godini utrošeno oko 1500 m³ vode. Za proizvodnju u smislu sirovine, utrošeno je oko 600 m³ vode što znači da se oko 900 m³ vode koristi kao rashladna voda. Ponovnom upotrebom rashladne vode uštedjelo bi se oko 900 m³ vodovodne vode.

Osim toga, sakupljanjem oborinskih voda dodatno bi se smanjila potreba za vodom iz vodovoda. Prosječna količina padalina na lokaciji smještaja tvornice prema podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda (DZHM) iznosi oko 850 mm/m². Površina na kojoj bi se sakupljala voda je veličine 850 m² (50 m×17 m) što bi na godišnjoj razini iznosilo 720 m³. Dakle, samo sakupljanjem oborinskih voda uspjele bi se podmiriti potrebe za vodom za proizvodnju na razini 2010. godine. Sva oborinska voda ne bi mogla biti iskorištena jer dio oborina pada u zimskim mjesecima kada nema velike proizvodnje i otežano je skladištenje vode zbog opasnosti od smrzavanja, ali bi se barem trećina oborinske vode dala upotrijebiti u proizvodnom procesu.

Prikupljena voda se može koristiti i za hlađenje emulzije pri čemu bi se sama voda grijala. Takva zagrijana voda bi se zatim koristila za proizvodnju emulgatora čime bi se smanjio utrošak energije potreban za zagrijavanje vode uz istovremeno hlađenje gotovog proizvoda, emulzije. Emulzija bi imala bolju kvalitetu i mogla bi se brže pripremiti za isporuku utakanjem u bačve (Slika 1).



Slika 1. Shematski prikaz predloženog projekta uštede vode u proizvodnji proizvoda na bazi bitumena

4. DISKUSIJA

Prema predloženom projektu uštede vode u proizvodnji bitumenskih proizvoda, voda iz vodovoda koristila bi se za proizvodnju emulzije kao sirovina te za hlađenje brtvi koloidnog mlina (Slika 1, br. 2). U procesu proizvodnje bitumenskih otopina i pasti (Slika 1, br. 1), voda se koristi isključivo kao sredstvo za hlađenje. Voda za hlađenje sada završava u tankvani (Slika 1, br. 3), a iz nje se potopnim pumpama odvodi u kanalizaciju. To je voda koja nije onečišćena i koja se može ponovno koristiti u procesu proizvodnje. Zbog toga bi se ona prikupljala u spremniku (Slika 1, br. 4). U istom spremniku prikupljala bi se i oborinska voda. Prikupljena voda u tom spremniku bi se mogla koristiti na dva načina:

- za hlađenje svježe proizvedene emulzije (Slika 7, br. 5)
- za pripremu emulgatora (Slika 1, br. 7)

Voda za pripremu emulgatora se mora zagrijati na 50 °C u grijaču vode (Slika 1, br. 6).

4.1. Prikupljanje otpadnih tokova

Na slici 1 je prikazana skica prijedloga projekta recirkulacije vode. Postoje tri toka vode koja bi se prikupljala i ponovno koristila:

- voda za hlađenje brtvi koloidnog mlina
- voda za hlađenje miješalice smještene u posebnoj prostoriji
- oborinska voda

Vodu za hlađenje brtvi koloidnog mlina je jednostavno prikupiti. Postojeći odvod vode za hlađenje brtvi nije daleko od spremnika označenog s oznakom 1AD (Slika 1, br. 4) te ga treba produžiti do ulaska u spremnik i ugraditi

dodatne ventile za ispuštanje vode iz tog cjevovoda u zimskim mjesecima kako bi se uklonila mogućnost pucanja cijevi zbog smrzavanja.

Vodu za hlađenje miješalice u posebnoj prostoriji potrebno je prvo prikupiti u međuspremnik minimalne zapremine 1 m³ te bi se iz njega voda posebnom potopnom pumpom automatski prepumpavala u spremnik 1AD. U tu svrhu potrebno je sprovesti odvodne cijevi hlađenja miješalice van posebne prostorije i priključiti ih na međuspremnik. Iz međuspremnika bi se voda zatim pumpala u spremnik 1AD. Pumpa bi se automatski uključivala pomoću plovka koji bi pratio razinu vode u međuspremniku. Isti međuspremnik bi se koristio i za sakupljanje oborinske vode te bi morao imati preljev u kanalizaciju kako bi se uklonila mogućnost prelijevanja spremnika 1AD. Prije same pumpe morao bi postojati i filter u svrhu zaštite pumpe od krupnijih čestica koje bi mogle uzrokovati njezin kvar.

Oborinske vode bi trebalo sakupljati u dva međuspremnika – po jedan međuspremnik sa svake strane krova. Za sakupljanje vode na jednoj strani može se koristiti međuspremnik koji služi za sakupljanje vode za hlađenje miješalice smještene u posebnoj prostoriji. Drugi međuspremnik bi imao jednake karakteristike, ali bi bio smješten na suprotnoj strani krova. Pumpe u ovim međuspremnicima bi se automatski uključivale pri porastu razine u međuspremniku i automatski isključivale kad bi razina pala na neku minimalnu vrijednost. Pumpe u ovim međuspremnicima bi prestajale raditi u slučaju da razina vode u spremniku 1AD bude veća od dozvoljene, odnosno ako je spremnik 1AD pun. Višak vode bi tada odlazio iz međuspremnika u kanalizaciju preko preljeva.

4.2. Iskorištavanje prikupljene vode

Voda prikupljena u spremniku 1AD bi se prvenstveno koristila za pripremu emulgatora za proizvodnju bitumenskih emulzija. Korištenjem sakupljene vode za hlađenje emulzije bi se voda zagrijala, a emulzija ohladila, čime bi se smanjio utrošak energije potreban za grijanje vode za pripremu emulgatora te bi se povećala kvaliteta emulzije. Kako bi se iskoristila sakupljena voda potrebno je izgraditi cjevovod od spremnika 1AD preko spremnika emulzije do grijača vode u proizvodnoj hali.

U spremnike emulzije potrebno je ugraditi izmjenjivače topline. Sakupljena voda bi se iz spremnika 1AD pumpala kroz izmjenjivače u spremnicima emulzije u grijač vode u proizvodnoj hali. Grijač u hali bi trebalo izmijeniti tako da dovod vodovodne vode i dovod recirkulirane vode dolaze s gornje strane, dok bi se s donje strane posebnom pumpom zagrijana voda ispušćavala u miješalice emulgatora. Na taj način bi se dobila mogućnost korištenja vodovodne vode u slučaju da nije sakupljeno dovoljno vode (sadašnji sustav) uz onemogućavanje prodiranja recirkulirane vode u vodovodne cijevi.

4.3. Potrebni materijali i uređaji

Za izvedbu ovog plana potrebni su sljedeći uređaji i materijali:

- cijevi za produženje cjevovoda rashladne vode za hlađenje brtvi od ruba tankvane do spremnika 1AD
- dva međuspremnik za prihvata oborinske vode i vode za hlađenje mješalice u posebnoj prostoriji minimalnog volumena 1 m³
- cijevi za produženje cjevovoda od mješalice u posebnoj prostoriji do međuspremnik
- dvije potopne pumpe s automatskim uključivanjem pomoću plovka za pumpanje od međuspremnik do spremnik 1AD
- cijevi za cjevovode od međuspremnik do spremnik 1AD
- filter u međuspremnicima
- programski logistički kontroler (PLC) i vodovi za automatsko isključivanje pumpi u međuspremnicima u slučaju previsoke razine u spremniku 1AD
- pumpa i cjevovod za pumpanje iz spremnik 1AD kroz izmjenjivač topline na mješalicama emulzije u grijač vode u hali
- dva izmjenjivača topline na spremnicima emulzije
- pumpa i pomoćna pumpa za pumpanje vode iz grijača u mješalice emulgatora.

4.4. Potrebni zahvati i radovi

Da bi se ovaj prijedlog projekta mogao napraviti potrebne su sljedeće radnje:

- produživanje cjevovoda rashladne vode za hlađenje brtvi od ruba tankvane do spremnik 1AD
- postavljanje međuspremnik, produljivanje cjevovoda rashladne vode hlađenja mješalice u posebnoj prostoriji, montaža pumpi i cjevovoda za pumpanje iz međuspremnik u spremnik 1AD
- postavljanje cijevi za sakupljanje vode s krova
- kupovina izmjenjivača topline za mješalice emulzije, montaža pumpe i cjevovoda od spremnik 1AD do grijača vode u proizvodnoj hali
- demontaža cjevovoda bitumena sa spremnik 1AD i blindiranje otvora
- unutarnja zaštita spremnik 1AD od korozije
- montaža izmjenjivača topline na spremnik emulzije
- otvaranje grijača vode u proizvodnoj hali te prilagodba cjevovoda vodovodne vode tako da ulazi s gornje strane grijača
- izrada cjevovoda i montaža pumpi za pumpanje iz grijača u mješalice emulzije
- izrada softvera za praćenje razine spremnik 1AD i automatsko blokiranje rada pumpi u međuspremnicima.

5. ZAKLJUČAK

Mnoge industrije se suočavaju s problemom optimalnog korištenja vode u proizvodnim procesima. Sve se više pozornosti posvećuje zaštiti okoliša, što je veoma pohvalno jer je čovjek napokon shvatio važnost očuvanja okoliša. To je dovelo do uvođenja i poštivanja mnogih zakonskih normi i odredbi, strogih kriterija koje propisuje Europska unija, a s kojima je usklađeno i zakonodavstvo Republike Hrvatske.

Ponovna upotreba vode je siguran, održiv i ekonomičan način gospodarenja vodama za sve koji se brinu o prirodnim resursima. Ona se može na siguran način primijeniti u mnogim mjestima gdje nije potrebna pitka voda, kao što je navodnjavanje ili u svrhu hlađenja u proizvodnim procesima. Također se može upotrijebiti i oborinska voda koju treba sakupljati. U okviru ovog rada, razmatrana je mogućnost ponovne upotrebe vode koja se u procesu proizvodnje proizvoda na bazi bitumena koristi za hlađenje. Naime, voda koja je upotrebljena u jednom ciklusu hlađenja nije onečišćena, niti obogaćena hranjivim tvarima, pa se bez ikakve obrade može ponovno koristiti u sljedećem procesu hlađenja. Također se može sakupljati i oborinska voda, čime se smanjuje potreba za svježom vodom. Implementacijom ovakvog pristupa ujedno bi se smanjili troškovi vodovodne vode ali i odvodnje vode.

U okviru ovog rada predložen je projekt uštede vode u procesu proizvodnje proizvoda na bazi bitumena, kojim bi se uštedjelo oko 900 m³ vodovodne vode što uz cijenu vode od 23,21 kn+PDV iznosi 20.890 kuna godišnje. Osim očite ekonomske uštede, predloženi projekt pridonosi i očuvanju prirodnih resursa. Izuzetno je važno da industrije počnu shvaćati, da postoje mnoga moguća rješenja za uštedu vode u njihovim proizvodnim procesima, osobito one industrije, u kojima nije najvažnija zdravstvena ispravnost vode, kao što je slučaj u proizvodnji proizvoda na bazi bitumena. Ponovna upotreba vode važna je u očuvanju prirodnih zaliha pitke vode, kojih na Zemlji ima svakim danom sve manje.

6. LITERATURA

De Souza S, Medellín-Azuara J, Burley N, et al (2011) Guidelines for Preparing Economic Analysis for Water Recycling Projects. University of California, Center for Watershed Sciences, Davis

Salgot M (2008) Water reclamation, recycling and reuse: implementation issues. Desalination 218:190-197

U.S. Environmental Protection Agency (2012) Guidelines for Water Reuse. CDM Smith, http://www.swrcb.ca.gov/water_issues/programs/grants_oans/water_recycling/docs/econ_tskfrce/eagd.pdf 27.01.2014.

POSTIZANJE RESURSNE UČINKOVITOSTI OBJEDINJAVANJEM SEKTORA ENERGETIKE, VODE I OTPADA

ACHIEVING RESOURCE EFFICIENCY THROUGH THE INTEGRATION OF ENERGY, WATER AND WASTE SECTORS

Lidija Runko Luttenberger¹, Dinko Vujević², Mario Šiljeg², Ivana Gudelj³

¹ Komunalac d.o.o., Jurdani 50, HR-51213 Jurdani, HRVATSKA lidija.luttenberger@komunalac-opatija.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za inženjerstvo okoliša, Hallerova aleja 7, HR-42000 Varaždin, HRVATSKA

³ Hipalab d.o.o., Zagrebačka cesta 181, HR-10000 Zagreb, HRVATSKA

Abstract: Current economic growth and the presently deployed technology result in high entropic cost for the planet. Resource efficiency considers using the Earth's limited resources in a sustainable manner while minimising impacts on the environment. Paper presents the concepts of entropy and circular economy, and elaborates on waste, energy/nutrients and water nexus. Integrating the energy, water and waste sectors is indispensable for achieving resource efficiency. The Republic of Croatia should endeavour to benefit from this strategy to conserve its ecosystems and natural capital. Moreover, resource efficiency achievement can generate substantial benefits which include reduced landfill and carbon emissions, higher rates of re-use and recycling of products and greater job creation.
Keywords: resource efficiency, energy-water-waste nexus, environmental protection, circular economy.

Sažetak: Sadašnji gospodarski razvitak i prevladavajuća tehnologija uzrokuju visok entropijski trošak za planet. Resursna učinkovitost podrazumijeva korištenje ograničenih resursa ovog planeta na održiv način kako bi se smanjio čovjekov utjecaj na okoliš. Rad daje prikaz pojma entropije i kružnog gospodarstva te obrađuje poveznicu između otpada, energije/hranjivih tvari i vode. Objedinjavanje sektora energije, vode i otpada je nužno za postizanje resursne učinkovitosti. Republika Hrvatska treba nastojati izvući korist iz opisane strategije kako bi sačuvala svoje ekosustave i prirodni kapital. Nadalje, postizanje resursne učinkovitosti može značajno pridonijeti smanjenju emisija, povećanom stupnju uporabe i recikliranja proizvoda kao i stvaranju novih radnih mjesta.

Ključne riječi: resursna učinkovitost, poveznica energija-voda-otpad, zaštita okoliša, kružno gospodarstvo.

Received: 13.03.2015 / Accepted: 05.05.2015

Published online: 19.06.2015

Stručni rad / Technical paper

1. INTRODUCTION

Present method of measuring progress and the currently deployed technology result in high entropic cost for the planet. Technical solutions and research are presently concentrated on high-tech hardware for processing large amounts of waste (Runko Luttenberger 2014). Biological materials from farming/collection and technical materials from mining and material manufacturing, including water that humans use for producing goods and services are depleted and degraded in a manner that will lead to scarcity or unbearable costs of extraction. The paper analyses entropic nature of economic processes, presents the concept of circular economy, and elaborates on waste, energy/nutrients and water nexus that is crucial for achieving resource efficiency.

2. ENTROPIC NATURE OF ECONOMIC PROCESSES

Nature provides the energy, materials and services needed to sustain life and expand economic output. Until recently, these resources and services were largely ignored in standard models of economic production although there

exists a long and rich history of using thermodynamics and ecological principles to study economic systems (Cleveland 1999).

In 1965 Romanian economist Georgescu-Roegen wrote: „We tap low entropy by two essentially distinct procedures. We mine – or we shovel, as it were – the low entropy existing in the form of a stock in the Earth's crust. We also catch the low entropy which surrounds us in the form of a flow, the most vital of all being the flow of solar radiation. The first activity corresponds to mining, the second to husbandry. A third activity, manufacturing, merely transforms further the flow of low entropy fed by the first two sectors. Finally, consumption transforms the low entropy flow of consumer goods into high entropy. In this struggle, man has always striven to discover new sources of low entropy ...“ (Martinez-Alier 1997). The central role of the Second Law of Thermodynamics is that the entropy of the physical universe increases constantly because there is a continuous and irrevocable qualitative degradation of order into chaos. The entropic nature of the economic process, which degrades natural resources and pollutes the environment, constitutes the present danger.

The Earth is entropically winding down naturally, and economic advance is accelerating the process (Lozada 1995).

In 1972 the biophysicist Donella Meadows and her colleagues at the Club of Rome published *The Limits to Growth*, explaining how declining resources would eventually limit economic growth. The following year, economist Robert Solow delivered a lecture to the American Economic Association in response. Solow claimed that capital could be substituted for resources and that if this were true, then the world can, in effect, get along without natural resources according to the following formula:

$$\text{output} = \text{capital} \times \text{labour} \times \text{resources}$$

However, in any mechanical process energy is depleted and degraded. We cannot burn the same barrel of oil twice. Common sense tells us that a pile of boards and sawdust is not a tree, even if it represents the same amount of material. Although we can recycle materials, every transformation degrades matter and burns energy. Money, therefore, is not a substitute for energy, trees, fresh water or any other resource, and material constraints do indeed limit economic growth. The promoters of endless growth mock this as pessimism, but when one looks around at degraded Earth – acidic seas, drained aquifers, growing deserts, extinct species – what can be witnessed is the entropic cost of human economic growth (Wylar 2010).

Therefore, a living being can evade the entropic degradation of its own structure only. It cannot prevent the increase of the entropy of the whole system, consisting of its structure and its environment. On the contrary, from all we can tell now, the presence of life causes the entropy of a system to increase faster than it otherwise would (Georgescu-Roegen 1971).

3. CIRCULAR ECONOMY

Cycles mean renewal and regeneration for Earth as for organisms and ecosystems whose rhythms are tied to those of the Earth. Most, if not all environmental problems come from disrupting natural cycles by using up resources or generating wastes faster than the material cycles can accommodate. Top of the list is burning fossil fuels and generating CO₂ faster than the photosynthetic organisms can absorb, resulting in the increase of CO₂ in the atmosphere and global warming. Practically all biological activities are in cycles: those yielding energy being directly coupled to those requiring energy, and the giving and taking can be reversed as necessity arises. The activities occur over the entire range of space times, so no essential activity is left without energy at any one time (Ho 2012).

The closed loop model is a biomimetic (life-imitating) approach, a school of thought that takes nature as an example and considers that our systems should work like organisms, processing nutrients that can be fed back into the cycle – hence the “closed loop” or “regenerative” terms usually associated with it (Ellen MacArthur Foundation 2014).

Its application as an economic model was presented in 1966 by Kenneth E. Boulding in „The Economics of the Coming Spaceship Earth“ (Boulding 1966). The increasing scarcity of raw materials aroused economic interest in waste as a material resource, and countries began to invest in the re-use and recycling of waste which has been around for centuries. When done right, it delivers significant environmental benefits by reducing demand for raw materials, energy and water (Gunther, 2014).

The generic concept has been refined and developed by the following schools of thought (Ellen MacArthur Foundation 2014): Regenerative design (John T. Lyle); Performance economy (Walter Stahel); Cradle to Cradle (Michael Braungart and Bill McDonough); Industrial ecology (see also - Runko Luttenberger 2000); Biomimicry (Janine Benyuys) and Blue Economy (Gunter Pauli).

Cradle to Cradle (C2C) design for instance perceives the safe and productive processes of nature's 'biological metabolism' as a model for developing a 'technical metabolism' flow of industrial materials. Product components can be designed for continuous recovery and reutilisation as biological and technical nutrients within these metabolisms. The Cradle to Cradle framework addresses energy and water inputs. It eliminates the concept of waste, advocates the use of current solar income and management of water use to maximise quality, promotes health ecosystems and respects local needs (Ellen MacArthur Foundation 2014). Cradle to Cradle pursues eco-effectiveness or doing the right things (eco-efficiency implies doing things right) (Drucker 2002).

The sustainable handling of natural resources is not simply a question of technology, ecology and waste management but also includes economic, social, political, cultural and technical aspects; therefore the optimization of entire processes and systems rather than single components becomes increasingly important. This 'systems thinking' is at the core of the concept of circular economy (Circular Economy 2014). Donella Meadows, one of the authors of 1972 *Limits to Growth* whose forecasts still remain unchallenged (The Guardian 2014a) brought the very concept of systems thinking to wider audience (Meadows 2008).

The circular economy is based on a few simple principles: design out waste, build resilience through diversity, work towards using energy from renewable sources, think in 'systems', and prices must tell the truth. It draws a sharp distinction between the consumption and use of materials advocating the need for a 'functional service' model in which manufacturers or retailers increasingly retain the ownership of their products and, where possible, act as service providers – selling the use of products, not their one-way consumption. This shift has direct implications for the development of efficient and effective take-back systems and the proliferation of product-and business model design practices that generate more durable products, facilitate disassembly and refurbishment and, where appropriate, consider product/service shifts. In the past, reuse and service-life extension were often strategies in situations of scarcity or poverty and led to products of inferior quality. Today, they are signs of good

resource husbandry and smart management (Ellen MacArthur Foundation 2014).

The Ellen MacArthur Foundation has estimated that implementing circular opportunities at a global scale could yield over USD 1 trillion per annum in material savings. Eco-design will be critical in the circular economy as it has been estimated that 80% of the environmental impact of a product is determined at the design stage (The Guardian 2014b).

Design, manufacture, purchase or use of materials to reduce their quantity or toxicity before they reach the waste stream is source reduction, a proactive approach which reduces material and energy use. Recycling, composting, waste-to-energy, and landfilling are reactive methods for recovering and managing materials after they are produced (EPA 1995; Runko Luttenberger 2010).

Sustainable long-term solution is to implement a range of strategies such as (The Future of Energy 2012):

- establish 'nutrient pathways' for ingredients, materials and products so they can be used as biological or technical nutrients,
- use of organic compounds and nutrients in biodigestion, composting, fermentation or gasification processes returning into biogeochemical cycles of carbon and nutrients so the energy savings is actually by-product of the use (cycle) of compounds,
- classify chemicals and materials in industrial products into those which can be safely released into the biosphere, those that can be recycled effectively and those that can be downcycled safely and avoid the use of any chemicals or materials that can't be treated in this way,
- design for disassembly – make things that are 'made to be made again',
- design processes that can profitably recover precious resources for re-use,
- recognise that different countries will have their own ways of doing this,
- establish ways that industries can co-operate in innovation and use of materials,
- ensure that all of these strategies are environmentally safe and not harmful to humans.

Until a few years ago, very few people would take green or circular economy seriously. Not anymore. The major driver of the circular economy is not so much environmental concern as the soaring prices of commodities that seriously threaten growth in the business sector. European Commissioner for the Environment put it as follows: improving resource use is not just an environmental imperative; it is an issue of survival for businesses, as for the planet. He also reminded those who still think that protecting nature is bad for business of the tens of billions euros lost from flooding because EA's were ignored, stating that circular economy is a 'marriage of necessity' between business and the environment (Ho 2012). The timing is no accident: Prices of oil and energy have more than quintupled since 1998, metals prices have tripled and food prices have risen 75 per cent (Gunther 2014).

4. WASTE

The way of approaching circular economy is strongly connected not only with the existing political and governmental systems in individual countries, but also with the determination and awareness of local communities. For instance, Germany follows a combination of top-down and bottom-up approach, Switzerland has chosen a more bottom-up and participative path, and China has implemented the CE concepts from the top down, thereby becoming one of the first countries in the world to introduce circular economy in its constitution (Circular Economy 2014).

Waste is not only an environmental problem, but also an economic loss and burden for the society. Labour and the other inputs (land, energy, etc.) used in its extraction, production, dissemination and consumption phases are also lost when the „leftovers“ are discarded. Moreover, waste management costs money. Creating an infrastructure for collecting, sorting and recycling is costly, but once in place, recycling can generate revenues and create jobs. There is also a global dimension to waste, linked to our exports and imports. What we consume and produce in Europe could generate waste elsewhere. In some instances it actually becomes a good trade across borders, both legally and illegally (EEA 2014).

A number of communities worldwide introducing, and practicing zero waste concept is increasing. Their networks provide necessary information for interested communities to pursue the idea (Zerowaste Europe 2015).

5. ENERGY

In many countries, kitchen and gardening waste constitutes the biggest fraction of municipal solid waste. This type of waste, when collected separately, can be turned into an energy source or fertiliser. Anaerobic digestion is a waste treatment method that involves submitting biowaste to a biological decomposition process similar to the one in landfills, but under controlled conditions. Anaerobic digestion produces biogas/methane which can be used as fuel for cooking or even to run a car, or it can be delivered into the grid as gas or via generators as electricity. The residual nutrient rich digestate, which is also produced in bio-digestion, can be used for improved soil fertility. To move towards a circular economy we need to consider that materials are potentially too valuable to burn. If we incinerate rather than compost or digest organic material, at what point do we reach „peak soil“? Burning plastic (made from fossil fuels) isn't creating renewable energy – and it releases a lot of CO₂, just like burning coal or oil. Many metals used in various products are expensive materials which are mined with huge efforts from the earth and then burned – and the earth isn't making any more of them. It is estimated that up to 50 per cent of topsoil has been lost in the last 200 years. Burning organic materials like food and paper instead of composting them and returning their nutrients to the soil not only releases CO₂ but adds to this alarming loss of the undervalued stuff we grow our food in (The Future of Energy 2012; EEA 2014). Incineration is not waste to energy but wasting energy.

In implementing the concept, each city starts from a different point which depends on the existing infrastructure, political priorities and objectives. Within the EU projects, several European cities and regions have developed their concepts for biogas plants treating organic municipal waste and trained a number of municipalities, waste companies and consumers to move forward this implementation. Today, the greatest achievements of biomethane for road transport are found in Sweden however, a booming development has already started in the UK and France with Italy ready to join in (European Biogas Association 2014).

In fact, burning firewood for cooking also creates a lot of smoke and soot particles which contribute to air pollution which in turn causes health issues such as respiratory illness. Most of the pollution is due to poor combustion fuels and emitted greenhouse gases. Also increase in the concentration of hydrogen sulphide leads to headaches, dizziness, blurry vision, nausea and vomiting. Sulphur dioxide emissions lead to choking and sneeze-inducing effects. Biogas is a clean fuel compared to biomass or coal combustion. Cleanliness here refers to the cooking vessel not turning black in the bottom of the vessel. Air pollution by biogas is less because of few larger hydrocarbons. Most of small-scale digesters are concentrated in developing countries with India and China as leading countries accounting for the highest share. Many of small scale digesters do not require high maintenance and are more or less adaptable to the climate and condition of many of developing countries. However, adopting of biogas digesters is low in many countries (Rajendran *et al.* 2012).

6. WATER

Conventional sanitation solutions assume that the environment can handle the waste, or they shift the burden to downstream communities. Ecological sanitation, on the other hand, minimises the reliance on external inputs, while simultaneously reducing the output of wastes from the system. Many of the products (pharmaceuticals) may be partially or fully reconstituted when deposited into water, but when excreta are returned to soil, they appear to be broken down rapidly by soil microorganisms. Furthermore, both urine and faeces should be recovered and recycled to avoid long-term depletion of soils. Urine has been used in Europe for household cleaning, softening wool, hardening steel, tanning leather and dyeing clothes. The Greeks and Romans used it to colour their hair, and African farmers use it for fermenting plants to produce dyes. The Chinese pharmaceutical industry uses it to make blood coagulants (Esrey and Andersson 2001).

Water-borne sanitation as used in conventional sanitation systems is based on the collection and transport of wastewater via a sewer system, using (drinking) water as transport medium. The system mixes comparatively small quantities of potentially harmful substances with larger amounts of water and the magnitude of the problem is multiplied. In addition, the construction, operation and maintenance of the necessary hardware for the „flush and discharge“ options (sewer, wastewater treatment, drinking

water treatment) are a heavy financial burden. Conventional sanitation systems have even more fundamental shortcomings than their high costs such as over-exploitation of limited renewable water sources, pollution of soil and groundwater, waste of valuable components in wastewater and the difficulty for an effective removal of pollutants. Ecological sanitation technologies may range from natural wastewater treatment techniques to separating toilets, simple household installations to complex, mainly decentralised systems (Langergraber and Muellegger 2005).

According to Wilderer (Wilderer 2005) urban water re-use is to be considered a most promising solution to the water shortage problems in the fast growing cities in the world; decentralized sanitation and re-use systems allow rapid and step-wise improvement of urban water and sanitation infrastructure when installed simultaneously with the building of new houses, housing complexes, residential areas, tourist resorts, etc.; the various possibilities are to be carefully taken into account and evaluated as there is no single method universally applicable; to be selected and applied is that method which fits best into the existing infrastructural, socio-economic and socio-cultural environment; research is necessary to develop the various technical options to a level that allows safe application and control; demonstration facilities should be built up to study and gradually improve the performance of the different methods under realistic conditions.

Whilst most of the creativity and innovation in integrated decentralized water infrastructure is occurring at local levels, the barriers to innovation are severe: an engineering bias against decentralized systems, siloing of local agencies and national programs affecting local government, indifference of most of the public, and restrictive local ordinances. Many decentralized technologies are soil-based designs that are non-proprietary, so private companies cannot exclusively capture the benefits of any research. For example, research results on landscaping for stormwater retention, shallow trenches for wastewater treatment in soils, low-impact development systems, and other technologies could be used by any designer. They are not embedded in specific pieces of equipment that a manufacturer would produce. Therefore, no strong incentives exist for private firms to invest in this research. On the other hand private sector underinvests in basic research that could lead to fundamental redesigns in decentralized water infrastructures because such research is expensive and high-risk. Such research is appropriately conducted at non-profit universities, research institutes, or government laboratories, where public benefits and costs are properly aligned (Nelson 2008).

Various cases of ecological sanitation systems implemented may be found for instance in (CCB 2009; SuSanA 2015). The German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA) recently released working paper on the basic rules for implementation of new alternative sanitation systems (DWA 2014).

7. WATER-ENERGY/NUTRIENTS NEXUS

Water and energy systems are interconnected in a number of important ways. Water provides energy through hydropower and most thermal energy systems require water for cooling and also for the extraction of fossil fuels and biofuels production. Water supply and treatment systems generally use energy for pumping. Critical elements of water infrastructure can be energy intensive. Moving water over distances and elevation gains, treating and distributing it, using it for various purposes, and collecting and treating the resulting wastewater accounts for one of the largest uses of electricity in many areas (Wilkinson 2014).

The traditional western paradigm for wastewater treatment has focused primarily on removal of nutrients and organic matter at all costs via the aerobic activated sludge processes. That is, use of extensive energy in aeration to nitrify, followed by the use of wastewater and external carbon to drive denitrification. This produces a final effluent of outstanding quality, but is intensive in energy requirements, space (mainly due to clarifiers) and removes the nitrogen in a destructive process. There is now a widespread recognition that the activated sludge principle as is applied is inefficient, and that there are better options available with current technology. These concepts are developed from the basis that wastewater contains resources which should be recovered, including nutrients (nitrogen and phosphorus), energy, and water; and there is generally sufficient energy in wastewater to drive complete treatment. In most cases, anaerobic processes mentioned earlier have been identified as the key biochemical process, since they are non-destructive of nutrients, do not inherently produce a biomass by-product, and produce methane. There are really no technical challenges to implementation of this process, as the organic solids being digested are far more amenable to digestion than activated sludge biosolids. The process can have both domestic applications and for the recovery of nutrients and energy from municipal solid waste, agriculture and industry (Batstone 2014).

The lesson from photosynthesis is simple: use solar power for your energy and manage your water supplies wisely. Solar power's big benefits of being affordable, distributed, and not producing carbon dioxide emissions tend to overshadow one of its lesser known benefits as a power generation source. Solar power does not actively use water. Water and energy are inextricably linked not only in the natural world but also in our modern technological infrastructure (Mosaic Blog 2014).

8. CONCLUSION

In order to achieve resource efficiency it is necessary to design innovations in waste management 'software', to introduce policy measures to enhance resource productivity and curb demand, focus research and development on the goal of increasing resource productivity, increase awareness of resource limits, initiate the process of rethinking lifestyles, and improve communication between policymakers and the scientific

community. Systems where waste is not produced should be promoted and further developed and products should be reshaped with regard to durability, reparability, reuse and recycling. The Republic of Croatia as a country of great potential, particularly with regard to its geographic position, natural resources, small-scale agriculture, diversity of its ecosystems, length of the coast, karst, and aquifers should endeavour to benefit from this strategy and advance toward circular economy. It would therefore be necessary to implement decentralized sanitation with source separation, water reuse, separate collection of biowaste, the use of biogas and sludge, and to revive the collection, storage and consumption of rainwater from roofs and large collection surfaces and cisterns. Ecological sanitation would create numerous local work posts and be beneficial for the climate.

9. REFERENCES

- Batstone D (2010) Approaching anaerobic digestion with a view to resource recovery. IWA Yearbook 2010, www.iwahq.org, 1.9.2014
- Boulding KE (1996) The Economics of the Coming Spaceship Earth, <http://dieoff.org/page160.htm>, 1.9.2014
- Circular Economy, Swiss Academies of Arts and Sciences, 2014, http://www.satw.ch/publikationen/schriften/kreislaufwirtschaft/a_circulareconomy_with_references_EN.pdf, 1.9.2014
- Cleveland CJ (1999) Biophysical Economics: From Physiocracy to Ecological Economics and Industrial Ecology. In: Gowdy J, Mayumi K (eds) Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, England
- Druitt M (2009) The Swedish Eco-Sanitation Experience-Case studies of successful projects implementing alternative techniques for wastewater treatment in Sweden. Coalition Clean Baltic (CCB), Uppsala
- Drucker PF (2002) The effective executive, 4th ed, HarperCollins, New York
- DWA Working Paper DWA-A 272 (2014) "Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS)", [http://www.dwa.de/dwa/shop/produkte.nsf/92A25E39A7DAD257C1257CE7001D4C83/\\$file/vorschau_dwa_a_272.pdf](http://www.dwa.de/dwa/shop/produkte.nsf/92A25E39A7DAD257C1257CE7001D4C83/$file/vorschau_dwa_a_272.pdf), 12.03.2015
- EEA Signals 2014 – Well-being and the environment – Building a resource-efficient and circular economy in Europe (2014) EEA, Copenhagen
- Ellen MacArthur Foundation (2014) Rethink the future, www.ellenmacarthurfoundation.org, 15.8.2014
- EPA 530-R-95-023 (1995) Decision Maker's Guide to Solid Waste Management, Volume II, US Environmental Protection Agency
- Esrey SA, Andersson I (2001) Ecological Sanitation – Closing the Loop. UA-Magazine, <http://www.susana.org/en/resources/library/details/170>, 12.03.2015
- European Biogas Association: Biomethane with bright opportunities towards the 2030 target, www.european-biogas.eu, 1.9.2014.
- Georgescu-Roegen N (1971) The Entropy Law and the Economic Process. Harvard University Press, Cambridge

Gunther M (2014) Zero Waste World, Ensia, <http://ensia.com/features/zero-waste-world>, 1.9.2014

Ho MW (2012) Living Green and Circular, test.permaculturenews.org. 13.1.2012

Langergraber G, Muellegger E (2005) Ecological Sanitation – a way to solve global sanitation problems?. *Environ Internat* 31:433-444

Lozada GA (1995) Georgescu-Roegen's defense of classical thermodynamics revisited. *Ecol Econ* 14:31-44

Martinez-Alier J (1997) Some issues in agrarian and ecological economics, in memory of Georgescu-Roegen. *Ecol Econ* 22:225-23

Meadows Donella H (2008) *Thinking in Systems*, Chelsea Green Publishing, White River Junction

Mosaic Blog: Why Sun and Water Dictate the Future of Energy, www.joinmosaic.com. 29.5.2014

Nelson VI (2008) *New Federal Financing Directions: Decentralized Water Resource Infrastructure*. White Paper, X-830851

Rajendran K et al (2012) Household Biogas Digesters – A Review. *Energies* 5:2911-2942

Runko Luttenberger L (2000) Life Cycle Assessment (LCA) – A System Tool in Industrial Ecology. *Eng Rev* 20:53-60

Runko Luttenberger L (2010) Environmental Protection Based on Waste and Water Utility Service Management, *Strojarstvo* 52:631-649

Runko Luttenberger L (2014) Challenges on Energy, Water and Waste Sector in Achieving Resource Efficiency. *Energy and the Environment 2014*, Opatija

Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA). www.susana.org. 8.3.2015

The Future of Energy – Energy challenges in a circular economy (2012) National Grid and Ellen MacArthur Foundation, V1.1

The Guardian: Limits to Growth was right. New research shows we're nearing collapse. <http://www.theguardian.com/commentisfree/2014/sep/02/limits-to-growth-was-right-new-research-shows-were-nearing-collapse>. 2.9.2014

The Guardian: Circular economy is turning the old waste sector into a resource industry, <http://www.theguardian.com/sustainable-business/circular-economy-old-waste-sector-resource-management>. 30.1.2014

Wilderer PA (2005) Water supply and sanitation – a major challenge for Europe. *Water Sci Technol*, 51:1-6

Wilkinson RC (2014) Integrating Water and Energy Resource Management In the Context of Climate Change. www.groundwater-conference.uci.edu. 1.9.2014

Wylar R (2010) *Deep Green: Entropy and Ecology*, Greenpeace International. www.greenpeace.org. 25.3.2011

Zerowaste Europe. www.zerowasteurope.eu, 8.3.2015

ANALIZA UTJECAJA REŽIMA RADA CRPNE STANICE NA POTREBNI VOLUMEN VODOSPROME

ANALYSIS OF THE IMPACT OF PUMPING STATION OPERATING REGIME ON REQUIRED WATER RESERVOIR VOLUME

Bojan Đurin¹, Jure Margeta², Luka Jambrović¹

¹ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, bojan.djurin@gfv.hr, jambrovic.luka@gmail.com

² Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, HRVATSKA, margeta@gradst.hr

Sažetak: Tema ovog rada je analiza utjecaja režima rada crpne stanice, pogonjene različitim izvorima električne energije, na potrebni volumen gradske vodoopskrbne vodospreme, kapacitet crpne stanice i na emisiju stakleničkih plinova. Zbog sve većih štetnih utjecaja klimatskih promjena na ljude i okoliš, primjena obnovljivih izvora energije (fotonaponskog sustava), te racionalizacija potrošnje energije postaje važan zadatak i za vodoopskrbne sustave. Prijelaz na druge izvore i režim korištenja električne energije ima značajan utjecaj na održivost vodoopskrbnog sustava. Stoga se u radu analizira ova problematika i mogući drugačiji koncepti dimenzioniranja vodospreme i crpne stanice. Problematika će se, zbog nedostataka stvarnih mjerenih podataka, analizirati na temelju tipičnog primjera i dostupnih podataka. Bez razlike na takav pristup, dobiveni rezultati omogućavaju donošenje znanstvenih zaključaka i time imaju širi značaj za struku. Analiziraju se tri režima rada crpne stanice i time dotjecanja vode u vodospremu: kontinuirano jednoliko kroz 24 sata, u periodu insolacije i u periodu jeftine električne energije od 22 do 8 sati. Dobiveni rezultati analizirani su u odnosu na ekonomske, socijalne i ekološke kriterije. Utvrđeno je da je primjena FN sustava moguća i korisna, ali da ima značajan utjecaj na potrebni kapacitet crpne stanice i volumen vodospreme. Zbog toga korištenje ovih izvora zahtjeva detaljniju analizu i drugačiji pristup u odnosu na uobičajene inženjerske postupke, a koji vodi računa o promjenjivosti veličine dnevne insolacije.

Ključne riječi: vodosprema, crpna stanica, energija, ekonomski, ekološki i socijalni pokazatelji.

Abstract: Topic of this paper is analysis of the impact of pumping station work regime, driven by different sources of electric energy, to the required volume of the city's water supply storage tanks, pumping stations capacity and to Greenhouse gas emissions. Due to the increasing adverse impacts of climate change on people and environment, applications of renewable energy sources (photovoltaic system) and the rationalization of energy consumption becomes an important task for the water supply systems. The transition to other sources and regime of using of the electricity has a significant impact on the sustainability of the water supply system. Therefore, paper analyzes this problems and possible different concepts of the sizing of storage tank and pumping station. The issue will be, due to the lack of actual measured data, analyzed on the basis of typical example and available data. Regardless of this approach, the obtained results enable enactment of the scientific conclusions and thus they have broader implications for the profession. Three regime of pumping stations and thus inflow of water in the water tank has been analyzed: continuously uniformly over 24 hours, during typical insolation and during the period of the cheap electric energy from 10 PM till 8 AM. The results were analyzed in relation to economic, social and environmental criteria. It was determined that the application of a PV system is possible and useful, and it also has a significant impact on the required capacity of the pump station and the storage tank volume. Therefore, the use of these resources requires a more detailed analysis and a different approach in regards to conventional engineering methods, which take into account the variability of the size of insolation per day.

Keywords: storage tank, pump station, energy, economic, ecologic and social indicators.

Received: 19.03.2015 / Accepted: 22.05.2015

Published online: 19.06.2015

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Vodoopskrbni sustav naselja sastoji se od više objekata povezanih u funkcionalnu cjelinu na način da naselju trajno osiguraju dovoljne količine kvalitetne vode na što ekonomičniji način uz minimalni negativni utjecaj na okoliš. Cilj upravljanja sustavom je postići tehnološki siguran i ekonomski učinkovit vodoopskrbni sustav koji osigurava:

- neprekinutu opskrbu potrošača s potrebnim količinama;
- vodu standarda vode za piće;
- tlak u traženim granicama;

- potrebnu sigurnost u odnosu na količine, kakvoću i tlak;
- minimalne troškove, cijenu vode i negativni utjecaj na okoliš.

Vodoopskrbni sustav sastoji se od zahvata, postrojenja za obradu vode, glavnog dovodnog cjevovoda, vodospreme, glavnog opskrbnog cjevovoda, te vodovodne mreže. Osim ovih osnovnih objekata/elementa u vodovodu se koristi i cijeli niz drugih, uglavnom manjih, kao što su prekidne komore, ventili, zasuni i sl. Najznačajniji objekti sa stanovišta

sigurnosti rada su crpne stanice i vodospreme. Njihov raspored i broj najviše ovisi od topografskih i prostornih značajki vodoopskrbnog sustava, kao i o njegovom kapacitetu. Crpna stanica koja u sustavu ima posebni značaj je glavna crpna stanica kojom se pitka voda precrpljuje u vodospremu iz koje se voda gravitacijski distribuira potrošačima. Crpna stanica je najčešće najveći potrošač električne energije u vodoopskrbnom sustavu i zbog toga značajno utječe na troškove rada vodovoda i njegovu ekonomsku održivost. Naime, sve vode se moraju precrpiti na više kote terena u vodospremu koja svojim visinskim položajem osigurava potrebni tlak u vodoopskrbnoj mreži.

Raspored objekata određuje konfiguraciju vodoopskrbnog sustava koji, kao i svaki drugi sustav, ima svoje granice, ulaze, izlaze te elemente i procese. Glavni fizički ulazi u sustav su sirova voda i energija nužna za podizanje vode na određenu kotu terena, a izlazi voda zahtijevane količine, kvalitete i tlaka, te također gubici i energija. Dakle, gubici su komponenta vodoopskrbnog sustava, koja ulazi u bilancu vode u sustavu. Što se tiče energije, izlaz je tlak na mjestu korištenja, te gubici energije, odnosno topline, u procesima transformacije električne u mehaničku, te mehaničke u hidrauličku energiju, te gubici nastali tečenjem vode kroz vodoopskrbnu mrežu (cijevni sustav). Gubici vode u vodoopskrbnom sustavu mogu biti, a) stvarni (fizički) gubici: gubici na transportu i distribuciji čiste vode, gubici od istjecanja i prelijevanja iz vodospreme, gubici na priključcima do vodomjera i sl., te, b) prividni gubici: neodobrena potrošnja, greške mjerenja i sl. Generalno se može reći da su zahtijevani (željeni) izlazi iz sustava usluge koje poboljšavaju ljudski život i zdravlje: sigurnost, higijena, rekreacija, ugodnost i komfor, rast proizvodnih procesa (dohodak) te zdravlje i cjelovitost ekosustava. Glavni izlaz iz sustava je vodoopskrbna usluga/servis kojeg korisnici plaćaju.

Cilj dobrog gospodarenja vodovodom je minimizacija gubitaka vode i energije, te maksimizacija prihoda nastalih korištenjem vode iz sustava (Ramos et al., 2010). Uz ove tradicionalne kriterije, danas se javljaju i novi širi zahtjevi vezani uz ostvarenje ciljeva održivosti. U današnjim vodovodima koristi se energija proizvedena iz fosilnih goriva. Rezultat proizvodnje takve energije su staklenički plinovi koji negativno utječu na klimatske promjene i održivost. Zbog toga se smanjenjem potrošnje energije, a samim time i gubitaka, smanjuje ispuštanje stakleničkih plinova, što je jedan od ciljeva održivosti (Cabrera et al., 2010), (Zhou et al., 2013). Zamjena energije proizvedene iz fosilnih goriva sa Obnovljivim Izvorima Energije (OIE) naročito ide u prilog postizanju održivosti (Đurin & Margeta, 2014). Smanjenjem gubitaka vode direktno se doprinosi održivosti i očuvanju vodnih resursa. Sve su to važne teme, kao i problemi koje treba rješavati u vodoopskrbnim sustavima. Dakle, nužne su nove metodologije i rješenja (Ramos et al., 2010).

Objekti kojima se može značajno utjecati na ostvarenje ovih ciljeva su glavna crpna stanica (najčešće najveći potrošač energije u sustavu) i vodosprema kojom se bilancira voda i time energija u sustavu. Visinski

položaj vodospreme u odnosu na zahvat vode i vodovodnu mrežu (a samim time i tlačni odnosi u sustavu), i raspoloživi volumen su varijable koje izravno utječu na veličinu potrošnje energije. Uz navedeno, tlak u vodoopskrbnom sustavu direktno utječe na gubitke vode i energije, a samim time posredno i na veličinu ispuštanja stakleničkih plinova. Zbog toga je analiza i optimalizacija spregnutog rada glavne crpne stanice, vodospreme i vodovodne mreže od velike važnosti za svaki vodoopskrbni sustav.

Svaka promjena ulaznih veličina kao i izlaznih mijenja značajke sustava, ekonomske, ekološke i društvene. U ovom radu se analizira utjecaj promjene izvora i režima potrošnje električne energije na značajke sustava.

Za pretpostavljenu konfiguraciju sustava analizira se spregnuti rad glavne crpne stanice i vodovoda za različite izvore i režim korištenja energije. Rad je izrađen u sklopu završnog rada studenta Luke Jambrovića tijekom preddiplomskog studija Geoinženjerstva na Geotehničkom fakultetu u Varaždinu i predstavlja dorađenu verziju tog rada.

Uobičajeni metodološki pristup pri rješavanju problema dimenzioniranja vodospreme i crpne stanice bazira se na zadovoljavanju pretpostavljenih vršnih (maksimalnih) veličina potrošnje vode za odabranu konfiguraciju sustava. Ovakvim pristupom se objekti predimenzioniranju ali se zato dobije pouzdano rješenje. Dotok vode u vodospremu je konstantan tijekom 24 sata. Ovakav dotok vode kao rezultat daje najmanji potrebni instalirani kapacitet crpne stanice i time troškove građenja. Troškovi rada crpne stanice ovisi o cijeni električne energije tijekom 24 sata rada, niske i visoke tarife, i količini vode koja se precrpljuje. Potrebnu električnu energiju osigurava elektroenergetski sustav.

Ako se kod dimenzioniranja koristi/planira drugačiji režim rada crpne stanice rezultat će biti veći kapacitet crpne stanice ali i drugačiji troškovi rada, kao i potrebni kapacitet vodospreme. No, ukoliko se kao izvor energije koristi Sunčevo zračenje, tada je problem složeniji jer u obzir potrebno uzeti stohastičku prirodu njegove jakosti i trajanja. Navedeno iziskuje potrebu za naprednijim (inovativnijim) pristupom dimenzioniranja koji će u obzir uzeti režim potrošnje vode kao i raspoloživu insolaciju u planskom periodu.

U radu se obrađuje hipotetski primjer u cilju dobivanja informacija koje bi mogle biti od koristi kod upravljanja vodoopskrbnim sustavima. Analiza varijantnih rješenja spregnutog rada glavne crpne stanice i vodospreme, kao i provedena ekonomska i druga analiza radi se u svrhu dobivanja informacija i osnovnih indikatora održivosti za pojedine alternative, te utvrđivanja potrebne metodologije za njihovo planiranje. Cilj je utvrditi osnovne prednosti i nedostatke mogućih alternativnih rješenja napajanje električnom energijom na rad spregnutog sustava crpna stanica-vodosprema. Na ovaj način bi se dobile osnovne smjernice za daljnja istraživanja i moguću primjenu, bez razlike da li se radi o planiranju novog sustava ili upravljanju već izgrađenim sustavom.

2. METODOLOGIJA PRORAČUNA VODOSPROME I CRPNE STANICE

2.1. Funkcija vodospreme u vodoopskrbnom sustavu

Vodosprema je objekt koja se nalazi između postojeće dobave vode i opskrbnog područja, tj. između glavne crpne stanice i potrošača. Osnovne funkcije vodospreme u vodoopskrbnom sustavu su:

1. spremanje vode;
2. osiguranje potrebnog pogonskog tlaka u vodoopskrbnoj mreži;
3. sigurnost opskrbe.

Spremanje vode odnosi se na:

i. Spremanje vode vezano uz izravnjanje veličina protoke koja dotječe u vodospremu s količinama koje se troše u naselju, odnosno režima dotjecanja i potrošnje vode tijekom jednog dana (Volumen V_1 (m^3)). V_1 se kontinuirano mijenja ovisno o potrošnji i dotjecanju.

ii. Spremanje vode koja je nužna za gašenje požara u skladu s važećim Pravilnikom (Pravilnik, 2006) (Volumen V_2 (m^3)). V_2 mijenja se i troši od požara do požara;

iii. Spremanje vode za sve slučajeve poremećaja opskrbe koje se mogu javiti, odnosno to je rezervna količina vode za vodospremu (Volumen V_3 (m^3)). V_3 troši se samo kada se javi incidentne situacije koje ugrožavaju normalnu opskrbu naselja. Ovaj volumen se osigurava uglavnom radi mogućeg prekida dotjecanja vode zbog problema na zahvatu ili kvara crpnog sustava, a ponekad i zbog mogućeg prekida ili smanjenja opskrbe energijom;

iv. Spremanje vode vezano uz takozvani „mrtvi volumen“ koji predstavlja minimalno dozvoljenu razinu vode za osiguranje pogonskog tlaka u vodoopskrbnom sustavu (Volumen V_4 (m^3)). V_4 se iznimno troši kad je rezervna količina vode u vodospremi (V_3) potrošena.

Tlak u vodoopskrbnoj mreži ovisi o razini vode u vodospremi, odnosno o visinskom položaju vodospreme, te o veličini hidrauličkih gubitaka u vodoopskrbnom sustavu. U vodoopskrbnom području definiran je minimalni i maksimalni dozvoljeni tlak koji vodoopskrbni sustav mora osigurati. Minimalni slobodni tlak, koji treba osigurati u najvišem izljevnom mjestu u zgradama, reguliran je propisima i preporukama i uglavnom iznosi 5 m u satu maksimalne potrošnje. To je tlak koji omogućava nesmetano istjecanje vode na svim izljevnim mjestima i priključcima kućnih uređaja. Minimalni tlak u vodovodnoj mreži mora biti u skladu sa zahtjevima Pravilnika (Pravilnik, 2006) koji zahtijeva minimalni tlak od 2.5 bara u satu maksimalne potrošnje vode u naselju. Maksimalno dozvoljeni tlak u kritičnim točkama vodoopskrbne mreže (najniže geodetske kote cjevovoda) najčešće iznosi 6 - 8 bara (Margeta, 2010). Zadovoljavanje ovih tlakova postiže se izborom visinskog položaja vodospreme i hidrauličkih značajki opskrbnog cjevovoda i vodoopskrbne mreže. S obzirom da se vodosprema skoro uvijek nalaze iznad postrojenja za obradu sirove vode, odnosno zahvata sirove vode, nužno je koristiti crpnu stanicu za transport vode u vodospremu. U tom slučaju radi se o glavnoj crpnoj stanici pitke vode vodoopskrbnog sustava.

Vodosprema mora imati dovoljan volumen, mora osigurati kontinuitet opskrbe, biti nepropusna, sačuvati proizvodnu kakvoću vode, te biti ekonomski prihvatljiva za gradnju, održavanje i rad. Razlikujemo ukopane, poluukopane te vodospreme na terenu i iznad terena (koje se nazivaju vodotornjevima). Vodosprema, po svom položaju i funkciji, može biti ispred mjesta potrošnje ili iza mjesta potrošnje. Položaj vodospreme u vodoopskrbnom sustavu je rezultat optimalizacije rada sustava.

Vodosprema uz prikazane klasične funkcije i utjecaje u vodoopskrbnom sustavu ima veći i širi značaj koji danas sve više dolazi do izražaja. Njome se može kontrolirati proizvodnja i potrošnja energije, korištenje OIE te utjecati na ukupnu održivost sustava.

2.2. Dimenzioniranje vodospreme

Ukupni volumen vodospreme V_{uk} (m^3) čine efektivni volumeni vodospreme koji se sastoje četiri volumena:

$$V_{uk} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (1)$$

Ove veličine različite su od slučaja do slučaja jer svaki vodoopskrbni sustav je različit u odnosu na potrebe stanovništva, industrije i javnih ustanova, a posebno bolnica i vojarni, mogućih požara, te načina i mogućnosti rješavanja incidentnih situacija.

Volumen vodospreme V_1 izračunava se u skladu s planiranim režimom dotjecanja vode u vodospremu i planiranim režimom istjecanja vode iz vodospreme. Dimenzioniranje se obično obavlja grafički ili numerički odgovarajućim postupkom u skladu s potrebama, odnosno traženom preciznošću proračuna i valjanosti ulaznih podataka. U slučaju kad je poznat režim dotjecanja i istjecanja u grafičkom ili numeričkom obliku, potrebni volumen može se izračunati metodom integralne krivulje (Margeta, 2010). U ovom postupku sva voda koja u periodu bilanciranja dotječe ujedno i istječe, tako da je volumen vode u vodospremi na početku i na kraju perioda bilanciranja jednak. Uobičajeno se koristi metoda Riplea (Margeta, 2010). Metoda se sastoji u proračunu maksimalnog odstupanja između uzastopnih ispuštanja iz vodospreme Q_{izt} i dotjecanja u vodospremu Q_{ult} . Ukoliko se pretpostavi da je V_1 pozitivna ili negativna razlika ($Q_{ult} - Q_{izt}$) u vremenu t , maksimalna će vrijednost razlike V_1 između ispuštanja i dotjecanja u vremenu t do T biti jednaka:

$$V_1 = \max V_t = \max \left[\sum_{l=t}^j (Q_{ult} - Q_{izt}), 1 \leq j \leq t \right] \quad (2)$$

Ova relacija vrijedi samo ako u analiziranom vremenu istjecanje iz vodospreme u prosjeku nije veće ili manje od prosječnog dotjecanja, što je slučaj vodosprema u naselju. T u pravilu iznosi 1 dan, no za gradske vodospreme može biti najviše u rasponu do tjedan dana maksimalno (Margeta, 2010).

Određivanje protupožarne rezerve V_2 provodi se prema Pravilnik, 2006. Pri tome je potrebni volumen:

$$V_2 = \text{broj istovremenih požara} \times Q_{pož} \times T_{pož} \quad (3)$$

Volumen za incidentne situacije V_3 predviđa se za slučaj prekida dotoka vode u vodospremu. Ovaj volumen se koristi za vodoopskrbu za vrijeme dok se ne otkloni prekid (kvar, oštećenje, prekid napajanja električnom energijom). Volumen V_3 računa se kao:

$$V_3 = \text{broj dana prekida rada} \times \text{broj stan. (M)} \times q_{rez} \quad (4)$$

Mrtvi volumen V_4 je volumen, odnosno dubina vode nužna za održavanje pogonskog tlaka u vodoopskrbnom

sustavu. Obično je to dubina od 0.5 m do 1 m. Ovaj volumen će se zanemariti s obzirom na svoju malu veličinu.

Veličina operativnog volumena vodospreme V_1 je funkcija dotoka vode u vodospremu i istjecanja vode iz vodospreme. Ulaz vode u vodospremu je moguće kontrolirati, budući da se radom crpne stanice koja crpi vodu u vodospremu može upravljati, dok izlaz vode iz vodospreme nije moguće kontrolirati, budući da on ovisi o navikama i standardu ljudi, Slika 1.



Slika 1. Shematski prikaz režima ulaza i izlaza vode iz vodospreme

2.3. Dimenzioniranje crpne stanice

Uloga crpke je transport vode s jednog mjesta na drugo, odnosno najčešće s niže kote na višu kotu terena. Crpne stanice najviše se koriste za transport vode: (i) od zahvata do postrojenja za preradu sirove vode, te (ii) od postrojenja za preradu sirove vode do vodospreme. Uglavnom se koriste centrifugalne crpke koje putem tlačnih cjevovoda omogućuju dizanje vode na više kote terena i prebacivanje vode na veće udaljenosti.

U ovom radu crpke imaju veliku ulogu zbog svojeg ekonomskog značaja na cijeli projekt. Zbog toga će se u nastavku rada izračunati potrošne količine energije tokom cijele godine i odabrati najbolji i najjeftiniji režim rada crpne stanice. Potrebni kapacitet crpne stanice Q_{CS} (m^3/h), (l/s) jednak je:

$$Q_{CS} = Q_{dnev,max} / T_{CS} \quad (5)$$

gdje je $Q_{dnev,max}$ maksimalna dnevna potrošnja vode (m^3/dan), T_{CS} je trajanje rada crpne stanice (h).

Potrebna ulazna snaga crpke P_{CS} (W) dobije se pomoću:

$$P_{CS} = \frac{\rho \times g \times Q_{dnev,max}}{\eta} \quad (6)$$

gdje je ρ gustoća tekućine (kg/m^3), H je manometarska visina dizanja (m), η je učinkovitost crpke (%).

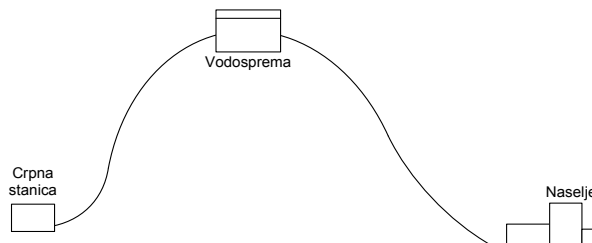
Dnevna potrošnje električne energije crpnih stanica N_{dnev} (kWh) dobije se pomoću:

$$N_{dnev} = P_{CS} \times T_{CS} \quad (7)$$

3. ANALIZA I RASPRAVA

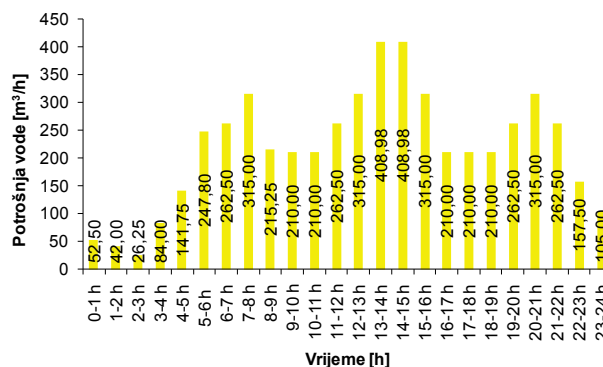
3.1. Ulazni podaci

Proračun se radi za jedan pretpostavljeni vodoopskrbni sustav, odnosno naselje, Slika 2. Pri tome je broj stanovnika $M = 30000$, specifična potrošnja vode $q_{spec} = 125$ $l/stan/dan$, maksimalni koeficijent dnevne neravnomjernosti $K_{D,N} = 1.4$, a maksimalni koeficijent satne neravnomjernosti $K_{S,N} = 1.87$.



Slika 2. Shema primjera koji se obrađuje

Ove veličine dobivene su iz pretpostavljenih režima potrošnje vode u naselju, dnevne i satne, Slika 3.



Slika 3. Prikaz stvarne potrošnje vode u vremenu od 0 do 24 h

Usvojena manometarska visina H_{CS} crpne stanice iznosi 30 m, dok je usvojena vrijednost učinkovitosti crpne stanice η jednaka 90 %.

Srednja dnevna potrošnja je $Q_{dnev,sred} = 3750 \text{ m}^3/\text{dan}$, dok je maksimalna dnevna potrošnja $Q_{dnev,max} = 5250 \text{ m}^3/\text{dan}$. Srednja satna potrošnja u maksimalnom danu potrošnje je $218.75 \text{ m}^3/\text{h}$, dok je maksimalna satna potrošnja jednaka $409.06 \text{ m}^3/\text{h}$. Ovo su tražene veličine na mjestu potrošnje vode. Međutim, svaki sustav ima određene gubitke vode tako da se isti moraju uzeti u obzir kako bi svi korisnici dobili tražene količine vode.

Usvojena ukupna duljina svih vodovodnih cijevi iznosi $SL = 36000 \text{ m}$. Usvojeni gubici vode u vodoopskrbnoj mreži po metru dužinom jednaki su $q_{spec,gub} = 0.0008 \text{ l/s/m}$. Znači, dnevni gubici jednaki su $2488.32 \text{ m}^3/\text{dan}$, dok su satni gubici vode jednaki $103.68 \text{ m}^3/\text{h}$. Ovo su prosječne veličine gubitaka. Stvarne veličine variraju iz sata u sat s obzirom na promjenu tlaka u mreži, koja je posljedica potrošnje vode. Ukupna dnevna potrebna količina vode za dimenzioniranje vodospreme je $7738.32 \text{ m}^3/\text{dan}$.

3.2. Varijante

Analiziraju se tri režima dotjecanja vode u vodospremu, odnosno s obzirom na moguću potrošnju energije: (a) kontinuirano jednoliko 24 sata, (b) u periodu tipične insolacije te (c) u periodu jeftine električne energije, od 22 do 8 sati. Zbog promjenjivog trajanja insolacije tijekom godine, razmatraju se tri varijante trajanja insolacije; (b1) u periodu od 6 do 20 sati, b2 u periodu od 8 do 18 sati te (b3) u periodu od 10 do 16 sati. Trajanje insolacije kao i trajanje crpljenja vode ima direktan utjecaj na rad crpne stanice i time potrebni volumen vodospreme. U ovom radu su se crpile iste količine vode u svim analiziranim varijantama. Normalno, trajanje insolacije i količina vode koja se mora prepumpati imaju i direktan utjecaj na potrebnu snagu FN postrojenja i snagu crpne stanice. Isto tako i režim tj. trajanje crpljenja uz korištenje energije iz energetskog sustava utječe na potrebnu snagu dobave energije i same crpne stanice.

U prvom slučaju (a) energija se troši kontinuirano bez razlike na cijenu tijekom dana. Ovo je varijanta u kojoj je najmanja veličina kapaciteta, odnosno angažirane snage crpnog sustava. U drugom slučaju (b) izvor energije je

Sunce, stoga je energija besplatna, ali je potrebno izgraditi FN postrojenje. U trećem slučaju (c) energija se troši u periodu jeftine električne energije. Normalno, kraći period crpljenja rezultira većim kapacitetom, odnosno većom angažiranom snagom crpnog sustava. Potpuna analiza varijantnih rješenja je složen zadatak koji je prelazio okvire i završnog i ovog rada. Zato je u ovom radu samo obavljen proračun kapaciteta glavnih dijelova sustava bez detaljne ekonomske analize.

U proračunu i analizama se uzimaju u obzir volumeni V_1 , V_2 i V_3 . Pri tome će se volumen V_1 dobiti korištenjem jednadžbe (2) i on će biti promjenjiv za sve tri varijante. Volumen V_2 dobiti će se korištenjem jednadžbe (3) i on će biti jednak za sve tri varijante. Pri tome se pretpostavlja prekid rada u dotoku koji iznosi dva dana, specifična vodoopskrbna količina iznosi $q_{rez} = 0.007 \text{ m}^3/\text{stan}/\text{dan}$. Proračunati volumen V_2 iznosi 420 m^3 . Pretpostavlja se da je broj istovremenih požara jednak 2. Količina vode za gašenje požara: $Q_{poz} = 2 \times 25 = 50 \text{ l/s} = 180 \text{ m}^3/\text{h}$. Pretpostavlja se vrijeme trajanja požara: $T_{poz} = 2 \text{ sata}$. Potrebni volumen za protupožarne rezerve V_3 , dobiven korištenjem jednadžbe (4) je 360 m^3 . Ukupni volumen V dobiti će se korištenjem jednadžbe (1).

3.3. Rezultati

3.3.1. Varijanta sa konstantnim dotokom vode u vodospremu u periodu od 24 h

Korištenjem jednadžbe (2) dobiveno je da je volumen V_1 jednak 1359 m^3 , dok je ukupni volumen vodospreme, prema jednadžbi (1) jednak $V_{uk1} = 2139 \text{ m}^3$. Potrebni kapacitet crpne stanice Q_{CS} , dobiven korištenjem jednadžbe (5), jednak je $322 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.3.2. Varijanta sa konstantnim dotokom vode u vodospremu u vrijeme insolacije (od 8 do 18 h)

Rad crpne stanice u svakom danu omogućen je samo za period trajanja Sunčevog zračenja, izraženo u satima. Rezultati proračuna za tri različita trajanja crpljenja uz korištenje jednadžbi (1-5) prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Kapaciteti crpne stanice i volumeni vodospreme za različita trajanja Sunčevog zračenja

Trajanje insolacije (h)	Kapacitet crpne stan. Q_{CS} (m^3/h)	Volumen vodospreme V (m^3)
b1) 6 do 20 (14 h)	553	2894
b2) 8 do 18 (10 h)	774	4442
b3) 10 do 16 (6 h)	1290	5688

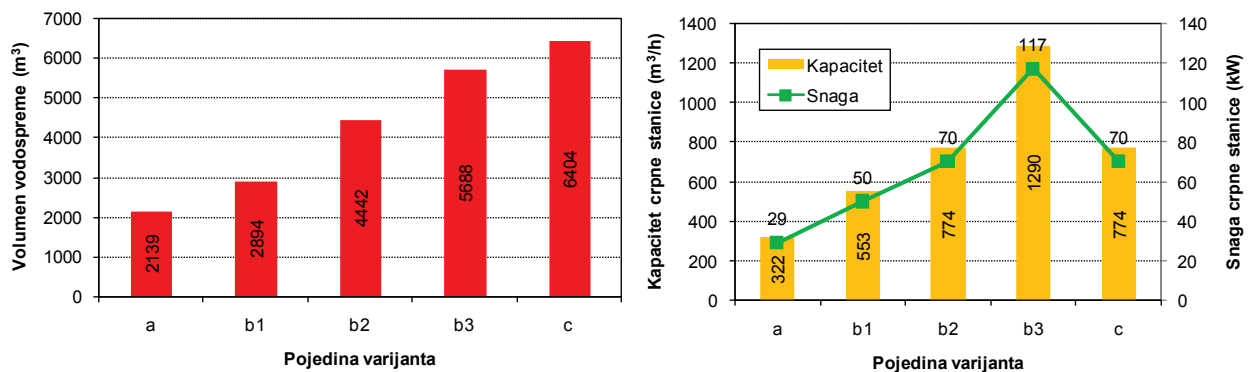
3.3.3. Varijanta sa konstantnim dotokom vode u vodospremu u vrijeme jeftinije električne energije (od 22 do 8 h)

Ukoliko se usvoji da će crpna stanica raditi tijekom perioda u kojem je električna energija jeftinija, dakle od 22 do 8 sati ($T_{CS} = 10$ sati), režim dotoka vode u vodospremu je drugačiji, a kapacitet glavne crpne stanice

veći u odnosu na kapacitet crpne stanice tijekom crpljenja vode u trajanju od 24 h (varijanta a). Korištenjem jednadžbe (2) dobiveno je da je volumen V_1 jednak 5624 m^3 , dok je ukupni volumen vodospreme prilikom dotoka vode tokom jeftine struje (22-8 h) $V_{uk3} = 6404 \text{ m}^3$, jednadžba (1). Potrebni kapacitet crpne stanice Q_{CS} , dobiven korištenjem jednadžbe (5), jednak je $774 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.3.4. Sumarni prikaz rezultata

Slika 4. prikazuje ukupne potrebne veličine volumena vodospreme te kapaciteta i snage crpne stanice za sve analizirane varijante.



Slika 4. Potrebne veličine volumena vodospreme, kapaciteta i snage crpne stanice za svaku varijantu

4. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

4.1. Ekonomske značajke

Ekonomske značajke sustava crpna stanica - vodosprema sagledati će se preko kapitalnih troškova crpne stanice i vodospreme. Izračunati će se samo osnovna

cijena (kapitalni troškovi) crpne stanice bez cijene energije.

Usvojiti će se prosječne vrijednosti iz literature i proračunati snaga crpke po vrijednostima koje iznose 1 € (7.5 Kn) za 1 W snage crpne stanice i 400 € (3000 Kn) za 1 m³ vodospreme (Hidroing, 2004), (Hrvatske vode, 2008), (Penstar, 2012), (White International, 2012). Proračun je prikazan u Tablici 2.

Tablica 2. Proračun troškova crpne stanice i vodospreme

Režim rada crpke	Troškovi crpne stanice (Kn)	Troškovi vodospreme (Kn)	Ukupni troškovi (Kn)
(a) 0 do 24 sati	219655	6418080	6637735
(b1) od 6 do 20 sati	376554	8682420	9058974
(b2) od 8 do 18 sati	527172	13325250	13852422
(b3) od 10 do 16 sati	878629	17063100	17941729
(c) od 22 do 8 sati	527172	19212690	19739862

Proračun pokazuje da cjelodnevni rad crpke (Varijanta a) ima najmanje investicijske troškove. Ovo je varijanta u kojoj je i najmanja veličina angažirane snage crpnog sustava.

U trećem slučaju (Varijanta c) troši se energija u periodu jeftine električne energije. U ovom slučaju je kraći period crpljenja što rezultira većom angažiranom snagom crpnog sustava i većim potrebnim volumenom vodospreme što rezultira i većim investicijskim troškovima.

U slučaju primjene FN postrojenja i korištenja solarne energije vidljivo je da period trajanja insolacije ima bitan utjecaj na kapacitet objekata i troškove. Sunce isijava tijekom dana kada je i najveća potrošnja vode zbog čega su potrebni znatno manji volumeni vodospreme. Međutim, što su kraći periodi potrebne su veće snage crpne stanice i time FN postrojenja.

Daje se pojednostavljeni proračun i prikaz troškova energije (Tablica 3) za sve tri varijante dotoka vode u vodospremu za sljedećih 20 godina. Slijedeće cijene tarifa odabrati će se iz (Hrvatska Elektroprivreda, 2014) te proračunati cijene električne energije za razdoblje od 20 godina za sve tri varijante dotoka vode u vodospremu. Pri tome se razmatraju dva slučaja insolacije.

Prvi je za teoretski slučaj potencijalne insolacije za svaki dan u godini s pretpostavkom da nema oblačnih i/ili kišnih dana. Drugi slučaj je za usvojeni broj dana bez prirodne insolacije odnosno nedovoljne insolacije (oblačni i/ili kišni dani), koji za Hrvatsku iznosi u prosjeku 80 dana godišnje (Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana, 2015) (*). U skladu s time, potrebno je osigurati dodatnu potrebnu količinu električne energije.

U pravilu, proračun bi se trebao izvršiti primjenom metode Neto Sadašnje vrijednosti, uzevši u obzir vremensku vrijednost novca. No, s obzirom na opseg i

sadržaj ovog rada, kao i s obzirom da je rad zamišljen na konceptualnoj razini analiziranog problema, spomenuta metoda neće se primijeniti. Cijena je odabrana na osnovu aktualnih podataka iz (Hrvatska Elektroprivreda, 2014).

Pri tome je za nisku tarifu usvojen plavi model (jedinstvena tarifa, od 0 do 24 h, koja iznosi 1.07 Kn/kWh

i bijeli model za jeftinu tarifu, od 22 do 8 h, koja iznosi 0.63 Kn/kWh. U obzir se uzima i naknada za mjernu uslugu koja iznosi 41.30 Kn/mjesecu za obje tarife. Također se u obzir uzima naknada za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i kogeneracije u iznosu od 0.035 Kn/kWh.

Tablica 3. Proračun troškova energije u razdoblju od 20 godina

Režim rada crpke	God. cijena el. energije (Kn)	Cijena el. energije za 20 god. (Kn)
(a) 0 do 24 sati	283992	5679834
(b1) od 6 do 20 sati	0 (*62632)	0 (*1252641)
(b2) od 8 do 18 sati	0 (*62632)	0 (*1252641)
(b3) od 10 do 16 sati	0 (*62632)	0 (*1252641)
(c) od 22 do 8 sati	171106	3422119

4.2. Ekološke značajke

Ekološke značajke sagledati će se preko ekvivalentne količine CO₂ koje se oslobađaju korištenjem fosilnih goriva, odnosno koje se neće ispustiti primjenom solarne energije. Ta količina iznosi 0.95 kg CO₂/kWh ukoliko se pretpostavi da je električna energija proizvedena u termoelektrani koja koristi ugljen (Glasnović i Margeta, 2011). Pošto varijanta sa dotokom vode i radom crpne stanice za vrijeme insolacije (b) ne proizvodi i ne ispušta CO₂, proračun će se odnositi samo na varijantu sa konstantnim dotokom (a) i dotokom vode u vodospremu za vrijeme jeftine struje (c). Proračun je izvršen za jednu godinu, pri čemu je emisija CO₂ jednaka 244 t, te za plansko razdoblje od 20 godina, pri čemu je emisija CO₂ jednaka 4875 t. Jasno je da je korištenje OIE sa ekološkog stanovišta najpovoljnije zbog čega se isto predlaže u svim strategijama održivosti.

4.3. Socijalne značajke

Za društvenu zajednicu su najvažnije socijalne značajke koje integralno sagledavaju cijenu usluge vodoopskrbe i održivost. To znači da bi trebalo proračunati cijenu vode i socijalni trošak klimatskih promjena i s tim u svezi smanjenje ispuštanja CO₂. U završnom i u ovom radu takav proračun nije napravljen. Održivost podrazumijeva i sigurnost opskrbe, a što je u slučaju vode za opskrbu stanovništva od izuzetne važnosti. Zato se svaki vodoopskrbni sustav opskrbljuje rezervnim elementima kojima se zadovoljava propisana sigurnost opskrbe vodom.

Ako se solarna energija koristi kao izvor napajanja crpne stanice, tada je potrebno u obzir uzeti i izvjestan rizik koji se može pojaviti zbog naoblake tj. nedovoljne ili premale jakosti insolacije. U tom slučaju može doći do prekida ili smanjenja opskrbe električnom energijom te time mogućeg ugrožavanja sigurnosti vodoopskrbe. Slično se razmatra i u slučajevima kada se koriste klasični izvori energije. Zato se kao rezerva za incidentne situacije uvijek instaliraju dizel agregati te se volumen vodospreme povećava. U slučaju napajanja sa solarnom energijom problem se otklanja osiguranjem solarnih akumulatora (baterija) uglavnom za dio redovitih potreba, dizel agregatom ili korištenjem električne energije putem klasične elektroenergetske mreže. Ovisno o instaliranom

kapacitetu rezervnog sustava napajanje električnom energijom dimenzionira se i rezervni volumen vodospreme iz kojeg se pokriva razlika u redovitoj opskrbi. Instaliranje rezervnih kapaciteta povećava ukupnu cijenu izvedbe i održavanja sustava.

Međutim, u slučaju korištenja solarne energije nužna rezerva za nedostatak insolacije se može riješiti i odgovarajućom metodologijom dimenzioniranja sustava FN postrojenje-Crpna stanica-Vodosprema. U ovom slučaju dimenzioniranje sustava se treba provesti za cijeli planski period. Znači, dimenzioniranje treba da uzme u obzir izmjerene dnevne vrijednosti insolacije kako su zabilježene u prošlom periodu, te dnevne vrijednosti potreba za vodom kako su planirane tijekom godine. Potrebni kapaciteti fotonaponskog postrojenja, crpne stanice i vodospreme su najveći izračunati kapaciteti u vremenskom nizu raspoloživih podataka. Kako su godišnji hodogrami raspoložive insolacije i potrebnih količina vode dinamički/trendovski slični, proizlazi da će sustav ljeti imati višak kapaciteta FN postrojenja jer je isti dimenzioniran na kritične (minimalne) zimske insolacije, a zimi višak volumena vodospreme jer je isti dimenzioniran na najveće ljetne potrebe za vodom. Koliki je taj višak, te je li dovoljan za planiranu sigurnost opskrbe treba utvrditi za svaki konkretni slučaj koji se rješava.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana pojednostavljena analiza utjecaja električne energije na značajke sustava crpna stanica-vodosprema i održivost sustava, odnosno na njegove ekonomske, ekološke i socijalne ciljeve. Dobivene veličine kapaciteta crpne stanice i volumena vodospreme proračunate su s obzirom na tri različita načina korištenja električne energije za crpljenje vode u gradsku vodospremu. To je rad crpne stanice konstantno tijekom cijelog dana (24 h), zatim uz korištenje solarne energije (uz tri različita trajanja insolacije), te uz rad crpne stanice tijekom perioda jeftinije električne energije (od 22 do 8 h).

Kontinuirani rad tijekom 24 sata (varijanta a)) osigurava najmanji instalirani kapacitet crpne stanice, dok volumen vodospreme ovisi o režimu potrošnje vode u naselju, a najviše o vršnoj potrošnji vode. Ovaj režim rada crpne stanice troši jeftinu energiju tijekom noći, dok tijekom dana u periodu vršne energije troši najskuplju energiju. Pri tome je kapacitet crpne stanice ove varijante

tri puta manji od varijante b3 tj. najvećeg kapaciteta i najmanji je u odnosu na sve varijante. U ovom slučaju je volumen vodospreme također najmanji, pri čemu je raspon vrijednosti između ovog i najvećeg volumena (varijanta c)) jednak 33 %.

Rad crpne stanice samo tijekom noći (varijanta c), tj. tijekom perioda u kojem je jeftina energija za rezultat ima značajno veći potrebni kapacitet crpne stanice i vodospreme s obzirom na varijantu a) jer crpna stanica radi tijekom noći kada je potrošnja vode najmanja tako da se tijekom noći sve dnevne potrošne količine (najveće) moraju precrpiti i spremi u vodospremu. U ovom slučaju, troškovi električne energije su najmanji s obzirom na sve varijante, pri čemu ukupni raspon između ove potrošnje i najveće iznosi 50 %. U oba navedena slučaj koristi se energija iz elektroenergetskog sustava, pretežito bazirana na fosilnim gorivima, pa su zbog toga i utjecaji na klimatske promjene najveći.

Korištenje solarne energije rezultira različitim kapacitetima crpne stanice i vodospreme ovisno o trajanju perioda insolacije i potrošnje vode. U ovom slučaju ulazna energija je besplatna, ali treba izgraditi FN postrojenje. U radu su razmotrena tri različita perioda rada bez analize kapaciteta i troškova izgradnje FN postrojenja. S obzirom da u ovom slučaju crpna stanica radi tijekom dana kada je potrošnja vode najveća potrebni su veliki kapaciteti crpne stanice (generalno gledano - uvijek manji nego u slučaju c), ali su potrebni vrlo mali volumeni vodospreme. U ovom slučaju proizvodnja energije ne utječe negativno na klimatske promjene, već naprotiv doprinosi njihovom smanjenju.

Dobiveni rezultati pojednostavljeno pokazuju osnovne prednosti i nedostatke korištenja različitih električnih energija. Najpogodniji oblik energije bitno ovisi o preferencijama donositelja odluke. Ako se preferiraju i minimiziraju troškovi investicije, tada je očito varijanta (a) najprihvatljivija. Ako se preferiraju troškovi potrošnje energije, tada je vjerojatno varijanta (c) najjeftinija. Ako se preferiraju ekološki kriteriji tada je očito varijanta (b) najprihvatljivija.

Uzevši u obzir trenutno ekonomsko stanje u društvu, razumljivo je da će ekonomski kriterij biti dominantan i da će se na osnovu njega prvenstveno birati najjeftinija rješenja (investicija + pogon). Međutim, uzevši u obzir negativne klimatske promjene, aktualne zakonske smjernice i odredbe za smanjenje emisija CO₂ (European Commission, 2009), (European Commission, 2014) kao i aktualne trendove realizacije održivih odnosno "pametnih" gradova, tada ekološki i socijalni kriteriji, kao i rizik i sigurnost u radu crpne stanice moraju biti obuhvaćeni u izboru konačne varijante rješenja. Primjenom višekriterijskih metoda te detaljnom SWOT analizom cjelovito obrađenih varijanti, dobio bi se stvarni uvid u njihov ukupni poredak, no navedeno prelazi opseg i namjenu ovog rada.

Dobiveni rezultati pokazuju da je uvođenje FN sustava za rad crpnih sustava u spregnutom radu s vodospremama

izvedivo te ekološki te dijelom i društveno opravdano. Takovi sustav je pouzdan ako se dimenzionira odgovarajućom metodologijom koja uzima u obzir promjenjivost potreba za vodom i insolacije tijekom godine. Uzimajući u obzir stalni pad cijene FN sustava te povećanje njihove ekonomičnosti proizlazi da bi vrlo skoro ovakvi sustavi mogli biti ekonomski i društveno opravdani.

6. LITERATURA

- Cabrera, E., Pardo, M., Cobacho, R., Cabrera, E., Jr. (2010) Energy Audit of Water Networks. *Journal of water resources planning and management*, 136(6): 669-677
- Đurin, B., Margeta, J., (2014) Analysis of the Possible Use of Solar Photovoltaic Energy in Urban Water Supply Systems. *Water*, 6: 1546-1561
- European Commission, (2014) 2030 framework for climate and energy policies, Bruxelles, Belgija
- European Commission, (2009) Directive 2009/29/EC, Bruxelles, Belgija
- Glasnović, Z., Margeta, J., (2011) Vision of total renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (4): 1873-1884
- Hidroing d.o.o. Split, (2004) Regionalni vodoopskrbni sustav: Neretva, Pelješac, Korčula, Lastovo, Mljet - Novelacija pred-investicijskog programa, Split, Hrvatska. Hrvatska elektroprivreda, <http://www.hep.hr/ods/kupci/poduzetnistvo.aspx> (datum pristupa web stranici 03.09.2014.)
- Hrvatske vode, (2008) Vodoopskrbni plan Splitsko-Dalmatinske županije, Split, Hrvatska
- Margeta, J., (2010) Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet
- Penstar Ltd., (2012) Cjenik, Penstar Ltd., Cardigan, UK
- Pravilnik o hidrantskoj mreži za gašenje požara, (2006) NN 8/06, Zagreb
- Ramos, H. M., Mello, M., De, P. K., (2010) Clean power in water supply systems as a sustainable solution: from planning to practical implementation, *Water Science & Technology: Water Supply*, (10)1: 39-49
- White International, (2012) CNP Industrial Pumps 2011, cjenik, Mippera, Australia
- Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana, <http://jadrana.gfz.hr/naoblaka.html>, datum pristupa 30.04.2015
- Zhou, Y., Zhang, B., Wang, H., Bi, J., (2013) Drops of Energy: Conserving Urban Water to Reduce Greenhouse Gas Emissions. *Environmental Science & Technology, Special Issue Design Options for More Sustainable Urban Water Environment*, (47): 10753-10761

IN-SITU ISPITIVANJA TLA ZA POTREBE IZGRADNJE CRPNE STANICE SUSTAVA NAVODNJAVANJA VAŠKA-KAPINCI

IN-SITU SOIL TESTING FOR CONSTRUCTION OF PUMPING STATION OF IRRIGATION SYSTEM VAŠKA-KAPINCI

Marija Đurinek¹, Krešo Ivandić¹, Stjepan Strelec¹

¹Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA,
marija.djurinek@gfv.hr, kreso.ivandic@gfv.hr, stjepan.strelec@gmail.com

Sažetak: U radu se opisuju dvije metode in-situ ispitivanja tla: statički penetracijski pokus (CPT) i ispitivanje teškom udarnom sondom (DPH). Prikazani su rezultati ispitivanja tla na mjestu izgradnje crpne stanice sustava navodnjavanja Vaška-Kapinci koji su uspoređeni s rezultatima dobivenim istražnim bušenjem. Provedena je usporedba kuta unutarnjeg trenja dobivenog iz korelacija sa CPT i DPH ispitivanjem te je izvedena korelacija između otpora na šiljku q_c i broja udaraca N_{10H} .

Cljučne riječi: statički penetracijski pokus, teška udarna sonda, otpor na šiljku, kut unutarnjeg trenja

Abstract: In this paper, two methods of in-situ soil testing are described: Cone Penetration Test (CPT) and Dynamic Probing Heavy (DPH). The results of tests carried out at construction site of pumping station of irrigation system Vaška – Kapinci are represented and compared with borehole data. Comparison of the friction angle derived from correlations with CPT and DPH tests is made and the correlation between cone resistance q_c and number of blows N_{10H} is derived.

Keywords: Cone Penetration Test, Dynamic Penetration Heavy, cone resistance, friction angle

Received: 29.05.2015 / Accepted: 05.06.2015

Published online: 19.06.2015

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Statički penetracijski pokus (Cone Penetration Test, CPT) je u posljednje vrijeme često primjenjiva metoda in-situ ispitivanja tla zbog niza prednosti naspram drugih metoda, kao što su: ekonomičnost, brzo i kontinuirano profiliranje tla, ponovljivi i pouzdani rezultati ispitivanja te dobra teorijska podloga za interpretaciju rezultata uz veliki broj korelacija sa geotehničkim parametrima tla kao i drugim in-situ metodama (Robertson 2012).

Nedostatak ovog pokusa je nemogućnost njegove primjene u uvjetima u kojima postoji mogućnost oštećenja sonde, primjerice u šljunkovitim tlima, pa postoji potreba za izvođenjem određenih dinamičkih penetracijskih postupaka ispitivanja, kao na primjer dinamičko sondiranje tla (Dynamic Probing, DP).

Općenito je preporuka da se prilikom izvođenja geotehničkih istražnih radova kombiniraju najmanje dvije metode in-situ ispitivanja tla kako bi se dobila kompletna slika o ponašanju temeljnog tla.

U ovom radu će se prikazati rezultati in-situ ispitivanja tla za potrebe izvedbe građevinske jame za izgradnju crpne stanice sustava navodnjavanja Vaška-Kapinci, gdje su uz istražno bušenje provedeni statički penetracijski pokus te ispitivanje teškom udarnom sondom (Dynamic Probing Heavy, DPH).

2. STATIČKI PENETRACIJSKI POKUS (CPT)

Statički penetracijski pokus (Cone Penetration Test, CPT) se sastoji od utiskivanja cilindrične sonde sa šiljkom na vrhu vertikalno u tlo pomoću niza šipki, konstantnom brzinom od 2 cm/s, pri čemu se mjere otpor šiljka sonde na statičko prodiranje (q_c) te trenje na plaštu sonde (f_s) (Lunne i dr. 1997). U današnje vrijeme se najčešće koristi suvremena digitalna elektronička oprema za ispitivanje koja omogućuje kontinuirano mjerenje navedenih veličina, za razliku od mehaničke opreme koja se prvi puta koristila u Nizozemskoj, 1930. godine. Ispitivanje tla se provodi u skladu sa zahtjevima danim u normi EN ISO 22476-1 za elektronički CPT, odnosno EN ISO 22476-12 za mehanički CPT.

Standardna sonda za ispitivanje tla statičkom penetracijom ima konusni šiljak sa unutarnjim kutom od 60° , promjera je 35,7 mm (površine 10 cm²) te ima površinu plašta 150 cm². Raznim senzorima dodanim na standardnu sondu, uz otpor na šiljku i trenje na plaštu, moguća su mjerenja i drugih veličina. Najčešće su to porni tlak gdje sonda (Piezocone, CPTu) ima ugrađen porozni prsten iznad šiljka za mjerenje pornog tlaka pri prodiranju sonde (u_2) te brzina seizmičkih valova kada sonda (Seismic Cone, SCPT) ima ugrađen trokomponentni geofon koji registrira seizmičke valove izazvane na površini terena. Upravo zbog toga statički penetracijski pokus ima široku primjenu u raznim vrstama tla.

Kada se mjerenja provode u sitnozrnatim koherentnim tlima, potrebno je izmjereni otpor na šiljku q_c korigirati zbog utjecaja pornog tlaka koji je vrlo velik zbog male vodopropusnosti sitnozrnatih tla, prema izrazu:

$$q_t = q_c + u_2(1 - a_n) \quad (1)$$

gdje je a_n faktor korekcije. Računa se prema slijedećem izrazu: $a_n = d^2/D^2$, gdje je D vanjski, a d unutarnji promjer sonde. Ovisi o konstrukciji sonde i za većinu sondi se kreće u rasponu $0,55 < a_n < 0,9$ (Lunne i dr. 1997).

Kod pijeska je korekcija minimalna jer je zbog velike vodopropusnosti izmjereni porni tlak gotovo identičan hidrostatskom pornom tlaku.

Značajnija primjena statičkog penetracijskog pokusa jest provedba klasifikacije tla. Precizna i korektna klasifikacija tla se temelji na njegovim fizikalnim karakteristikama (granulometrijski sastav tla, Atterbergove granice plastičnosti). Indirektno se može provesti klasifikacija i na temelju njegova ponašanja prilikom izvođenja statičkog penetracijskog pokusa. Iz tih razloga je usvojen pojam „tip ponašanja tla“ (Soil Behaviour Type, SBT) (Lunne i dr. 1997).

Razvijeni su klasifikacijski dijagrami za određivanje tipa ponašanja tla na temelju izmjerenih otpora na šiljku q_c i trenja na plaštu f_s . Danas je u upotrebi klasifikacijski dijagram kojega je predložio Robertson 1990 godine, slika 1 (Robertson 2012). S obzirom da otpor na šiljku i trenje na plaštu rastu po dubini zbog porasta efektivnog vertikalnog napreznja, u klasifikacijskom se dijagramu koriste slijedeće normalizirane vrijednosti:

- normalizirani otpor na šiljku:

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (2)$$

- normalizirani indeks trenja:

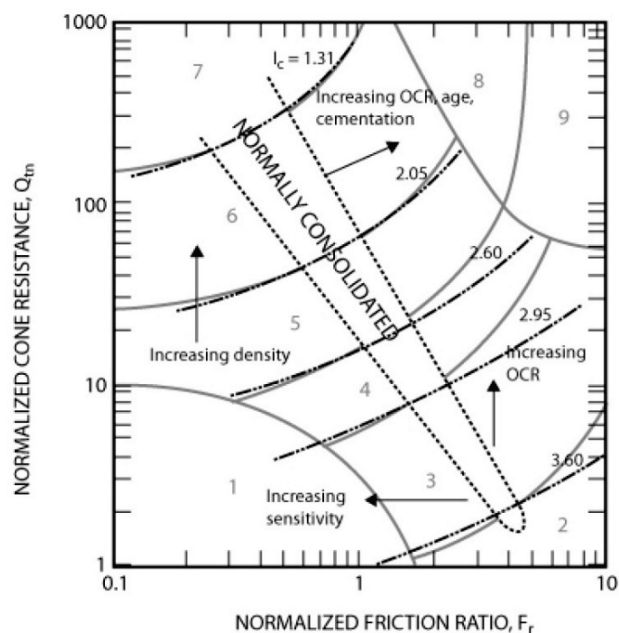
$$F_r = [f_s / (q_t - \sigma_{v0})] \cdot 100\% \quad (3)$$

- normalizirani indeks ponašanja tla:

$$I_c = [(3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (4)$$

Klasifikacijski dijagram je podijeljen u 9 područja koja redom predstavljaju slijedeće tipove ponašanja tla:

- 1 – osjetljivo (meko) sitnozrnato tlo
- 2 – organsko tlo do glina
- 3 – glina do prašinasta glina
- 4 – glinoviti prah do prašinasta glina
- 5 – prašnasti pijesak do pjeskoviti prah
- 6 – čisti pijesak do prašnasti pijesak
- 7 – šljunkoviti pijesak do pijesak
- 8 – vrlo kruti pijesak do glinoviti pijesak
- 9 – vrlo kruto tlo.



Slika 1. Normalizirani SBTn klasifikacijski dijagram (Robertson 2012)

Na dijagramu su također vidljivi „smjerovi“ porasta gustoće, koeficijenta prekonsolidacije (OCR) i cementacije krupnozrnatih tla te osjetljivosti i koeficijenta prekonsolidacije (OCR) sitnozrnatih tla. Indeks ponašanja tla I_c je radijus koncentričnih kružnica koje predstavljaju granice između pojedinih tipova tla. Granica između sitnozrnatog (koherentnog) i krupnozrnatog (nekoherentnog) tla je linija koja predstavlja $I_c = 2,60$ (slika 1).

U literaturi (Lunne i dr. 1997; Robertson 2012; HRN EN-1997-2:2012) postoji mnoštvo korelacija za određivanje geotehničkih parametara tla na temelju rezultata statičkog penetracijskog pokusa, kao i korelacija sa drugim metodama in-situ ispitivanja tla. Budući da bi njihovo objašnjenje izašlo izvan opsega i namjene ovog rada, one se neće navoditi i objašnjavati.

3. TEŠKA UDARNA SONDA (DPH)

Ispitivanje tla teškom udarnom sondom (Dynamic Probing Heavy, DPH) jest dinamički penetracijski pokus kod kojeg se sonda zabija u tlo pomoću utega mase 50 kg koji pada s visine od 50 cm. Sonda ima konusni šiljak sa unutarnjim kutom od 90° te promjer 43,7 mm (površina 15 cm²). Ispitivanje se provodi u skladu sa zahtjevima danim u normi HRN EN ISO 22476-2:2008 te HRN EN ISO 22476-2:2005/A1:2011. Otpornost na dinamičku penetraciju definira se brojem udaraca potrebnih za penetraciju sonde od 10 cm (N_{10H}).

U krupnozrnatom tlu je otpornost na penetraciju ispod razine podzemne vode manja nego iznad razine podzemne vode uslijed manjeg vertikalnog efektivnog napreznja te je potrebno provesti korekciju prema izrazu:

$$N_{10H} = a_1 \cdot N'_{10H} + a_2 \quad (5)$$

gdje je N_{10H} broj udaraca iznad razine vode, a N'_{10H} broj udaraca ispod razine vode, dok su koeficijenti $a_1 = 1,3$ i

$a_2=2,0$ za slabo graduirani pijesak, a $a_1=1,2$ i $a_2=4,5$ za dobro graduirani pijesak i šljunak (prema normi HRN EN ISO 22476-2:2008).

U sitnozrnatim tlima trenje koje se javlja duž šipki ima veliki utjecaj na otpornost na penetraciju, zbog čega ona raste po dubini. Kako bi se smanjio utjecaj trenja, šipke se zakreću za 1,5 okretaja ili do maksimalnog momenta torzije, nakon penetracije svake pojedine šipke (svakih 1 m dubine) te se mjeri moment torzije (T) potreban za zakretanje šipke.

Rezultati ispitivanja tla teškom udarnom sondom mogu se izraziti i preko dinamičkog otpora prodiranju sonde R_d (Cope 2011) koji se računa prema slijedećem izrazu:

$$R_d = \frac{g}{A} \left[\left(\frac{M^2}{M + M'} \right) \frac{h}{0.1} N_{10} + (M + M') \right] - \frac{T}{Ar} \quad (6)$$

gdje su: M – masa utega, M' – masa sonde i šipki, h – visina s koje pada uteg, N_{10} – broj udaraca potrebnih za penetraciju sonde 10 cm, A – površina poprečnog presjeka sonde, T – moment torzije potreban za zakretanje šipke, r – polumjer šipke. Uzimajući u obzir moment torzije, smanjuje

se utjecaj trenja između sitnozrnatih tla i površine oboda šipki na interpretaciju rezultata.

Teška udarna sonda se prvenstveno koristi u kombinaciji sa istražnim bušenjem za određivanje profila tla, a isto kao i kod ispitivanja statičkom penetracijom postoji niz korelacija za određivanje geotehničkih parametara tla kao i korelacija sa drugim in-situ metodama ispitivanja tla, prvenstveno standardnim penetracijskim pokusom (HRN EN 1997-2:2012).

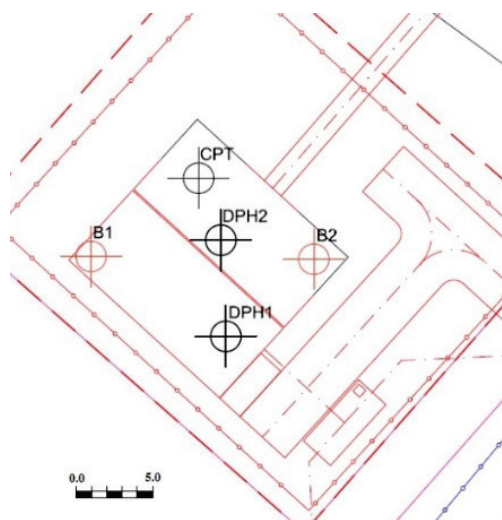
4. ISPITIVANJE TEMELJNOG TLA

4.1. Istražna lokacija

Istražna lokacija se nalazi na mjestu izvedbe građevinske jame za potrebe izgradnje crpne stanice sustava navodnjavanja Vaška-Kapinci u Virovitičko – podravskoj županiji. Crpna stanica će biti smještena s desne strane rijeke Drave (slika 2), u dravskoj potolini koju karakteriziraju sedimentne naslage kvartarne starosti. U sklopu geotehničkih istražnih radova planirano je izvođenje dvije istražne bušotine, dva ispitivanja teškom udarnom sondom te jedno ispitivanje statičkom penetracijom, u točkama čiji je tlocrtni položaj prikazan na slici 3.



Slika 2. Položaj crpne stanice(www.google.hr/maps)



Slika 3. Tlocrtni položaj istražnih točaka

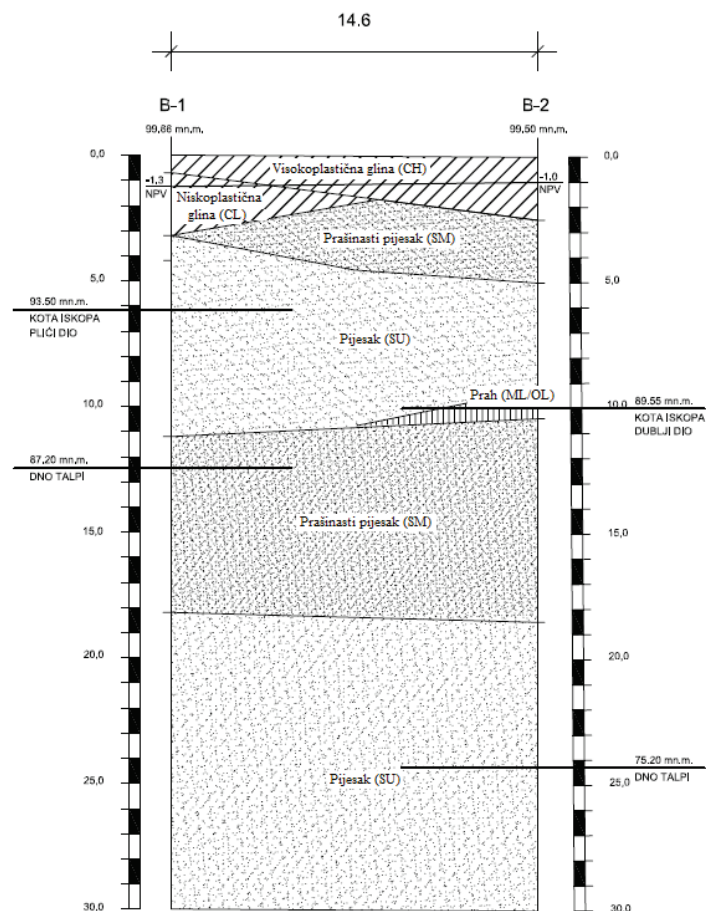
4.2. Istražno bušenje

Istražno bušenje provedeno je u dvije točke (B1 i B2, slika 3) na međusobnoj udaljenosti 14,6 m, jezgrenom cijevi sa ugradnjom zaštitnih kolona.

Obje bušotine izvedene su do dubine 30 m. Tijekom bušenja su izvađeni poremećeni uzorci tla koji su otpremljeni u laboratorij gdje je provedena klasifikacija tla.

Razina podzemne vode je ustanovljena na dubini 1,3 m na prvoj odnosno 1,1 m na drugoj bušotini. Geotehnički profil tla dobiven istražnim bušenjem prikazan je na slici 4. Na slikama 5 i 6 prikazane su izvađene jezgre iz prve odnosno druge bušotine sa 5 – 10 m dubine.

Iz slika je vidljivo kako je nabušeni materijal u najvećoj mjeri jednolično graduirani do prašnasti pijesak.



Slika 4. Geotehnički profil tla



Slika 5. Sondažna jezgra, 1. bušotina, dubina 5-10 m



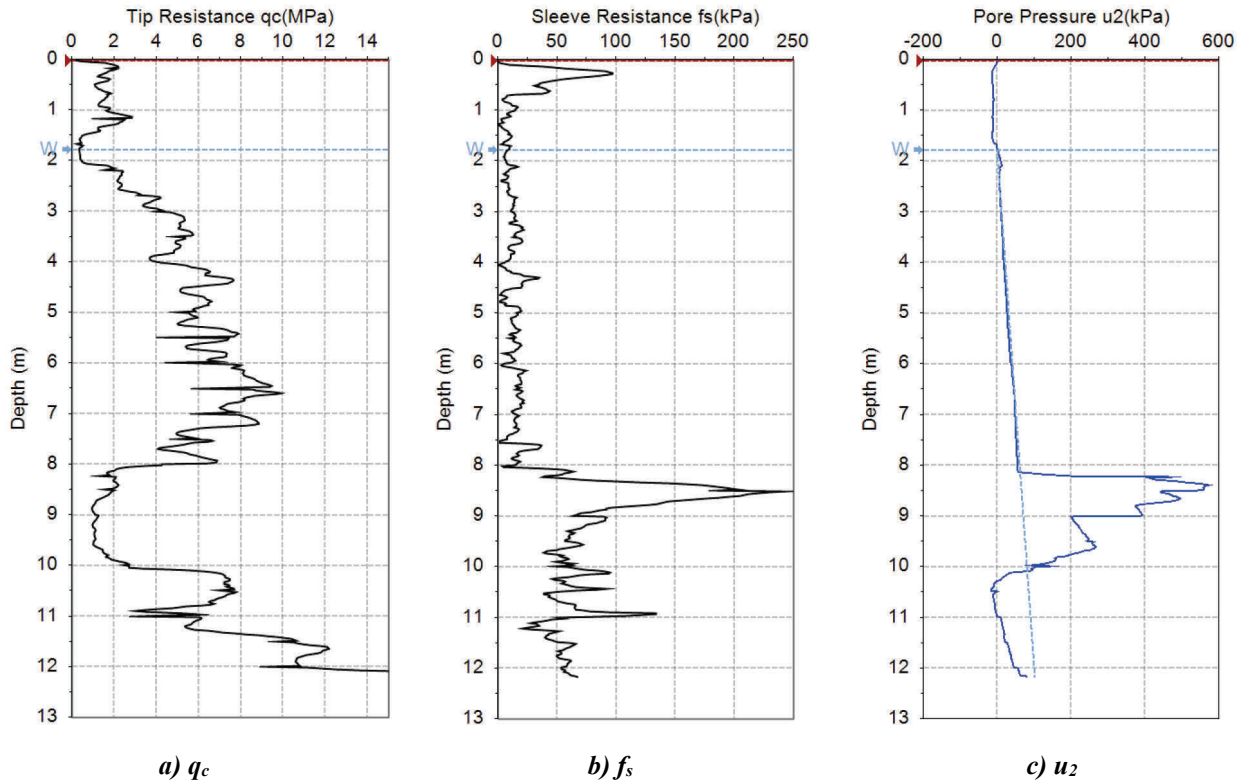
Slika 6. Sondažna jezgra, 2. bušotina, dubina 5-10 m

4.3. Statički penetracijski pokus (CPT)

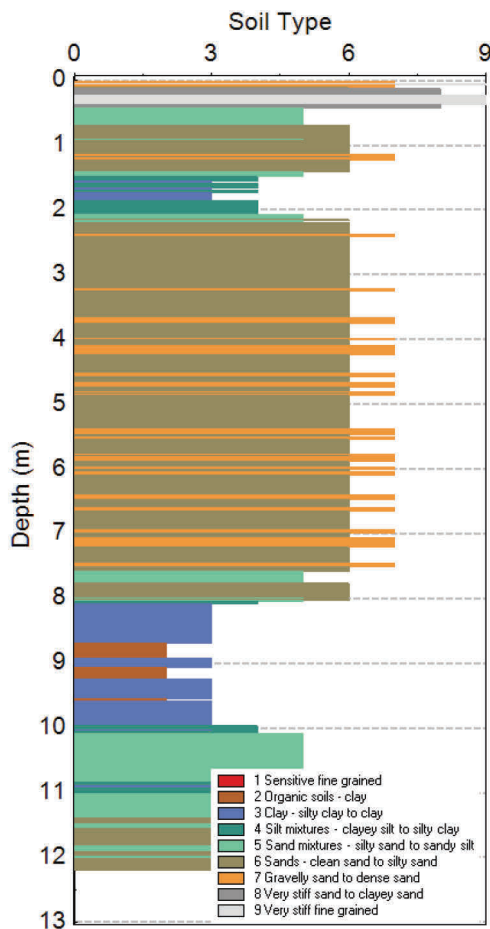
CPT izveden je do dubine 12 m, u točki prikazanoj na slici 3. Razina podzemne vode ustanovljena je na dubini 1,78 m. Rezultati ispitivanja tla obrađeni su u računalnom programu NovoCPT ©2012 (Novo Tech Software Ltd.). Na sl. 7a prikazan je izmjereni otpor na šiljku sonde q_c (MPa), na sl. 7b izmjereno trenje na plaštu f_s (kPa), a na slici 7c izmjereni porni tlak u_2 (kPa). Na sl. 8 prikazan je tip ponašanja tla po dubini, a na sl. 9 normalizirani klasifikacijski dijagram prema Robertsonu (1990).

4.4. Ispitivanje teškom udarnom sondom (DPH)

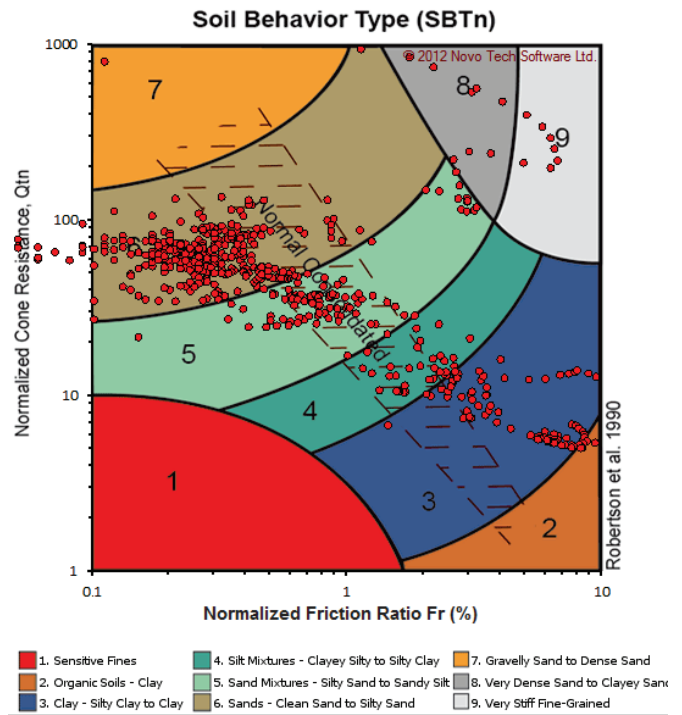
Ispitivanje tla teškom udarnom sondom provedeno je u dvije točke (slika 3) do dubine 14 m. Mjeren je broj udara N_{10H} na svakih 10 cm dubine te moment torzije T na svakih metar dubine. Izmjerene vrijednosti su obrađene i prikazane na slikama 10 i 11. Razina podzemne vode je u obje točke zabilježena na dubini 1,8 m. DPH koristi uteg koji pada s visine od 50 cm.



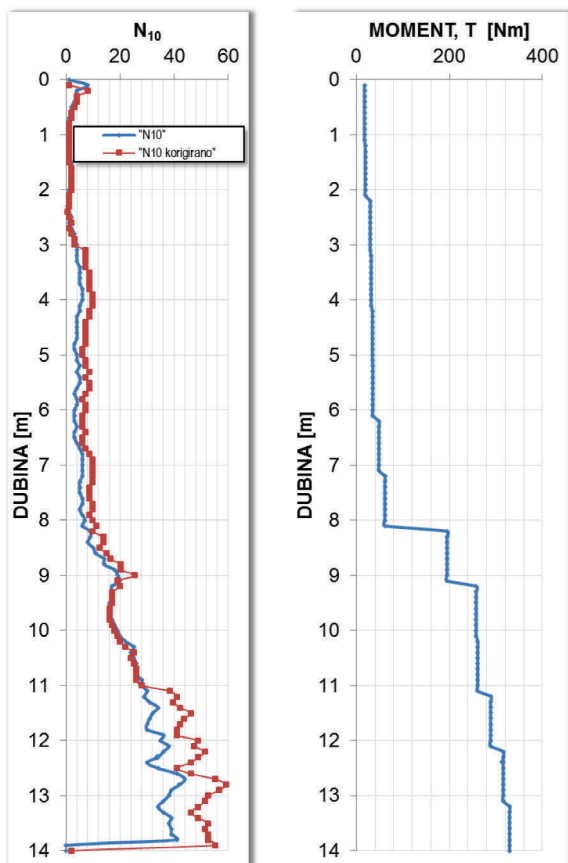
Slika 7. Rezultati CPT pokusa



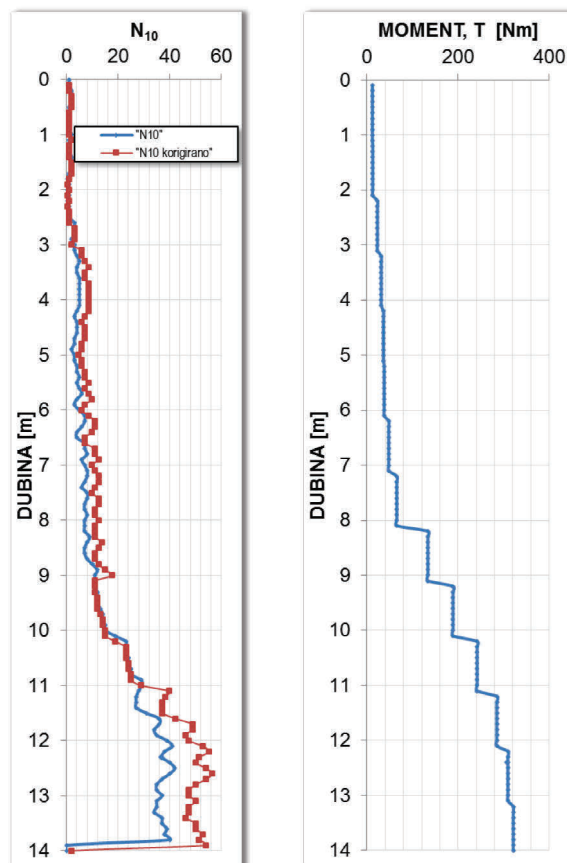
Slika 8. Tip ponašanja tla, SBTn



Slika 9. SBTn klasifikacijski dijagram



Slika 10. N_{10} i moment torzije u točki 1



Slika 11. N_{10} i moment torzije u točki 2

4.5. Diskusija rezultata ispitivanja tla

Usporedbom rezultata ispitivanja tla statičkom penetracijom s rezultatima dobivenim istražnim bušenjem uočava se podudaranje do dubine 8 m te na dubini 10 – 12 m. Vidljiva je prednost CPT ispitivanja kojim se dobivaju rezultati na svakih 2 cm dubine za razliku od istražnog bušenja gdje se uzorkovanje tla provodi u pojedinačnim točkama po dubini.

Određeno odstupanje rezultata CPT ispitivanja i istražnog bušenja uočava se na dubini 8 – 10 m. Na slici 7 vidljivo je značajno smanjenje otpora na šiljku sonde na spomenutoj dubini, kao i povećanje trenja po plaštu sonde i pornog tlaka što ukazuje na prisustvo gline.

Na slikama 8 i 9 vidljivo je da je na dubini 8 – 10 m tlo prema normaliziranom Robertsonovom klasifikacijskom dijagramu klasificirano kao glina do prašnasta glina (područje 3) s proslojcima organskog materijala (područje 2). Istražnim bušenjem na bušotini B1 na spomenutoj dubini nije detektirana glina, što je vidljivo na slici 5 (jezgra sa dubine 5 – 10 m).

Na bušotini B2 je na dubini 10 m detektiran tanki sloj praha s proslojcima organskog materijala, što je vidljivo na slikama 4 i 6.

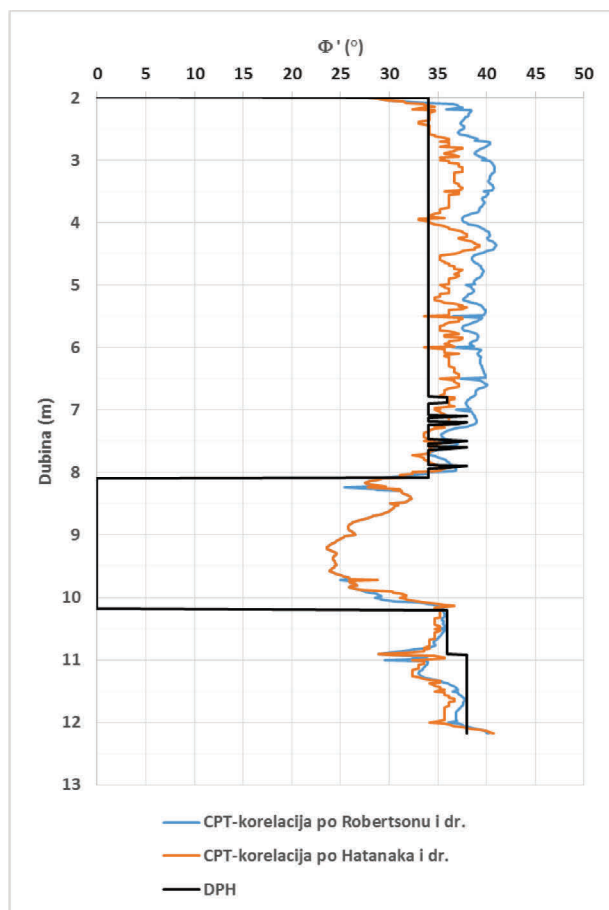
Rezultati DPH ispitivanja također ukazuju na postojanje gline na dubini 8 – 10 m. Na slici 10 je vidljivo značajno povećanje momenta torzije na dubini 8 m te zanemarivo povećanje na dubini 10 m gdje završava sloj gline. Na slici 11 također je vidljivo značajnije povećanje momenta torzije na dubini 8 m.

Razlog zašto glina nije detektirana istražnim bušenjem jest bočno istiskivanje gline izvan jezgre cijevi zbog čega je u njoj preostao samo uzorak pijeska.

4.6. Usporedba kuta unutarnjeg trenja tla dobivenog CPT i DPH ispitivanjima

Budući da se na mjestu izgradnje crpne stanice planira izvesti građevinska jama, potrebno je odrediti parametre čvrstoće tla. Na slici 12 prikazana je usporedba efektivnog kuta unutarnjeg trenja temeljnog tla (ϕ') dobivenog iz korelacija sa rezultatima CPT i DPH pokusa. Korišteni su rezultati DPH pokusa izvedenog u točki 2 (4 m od CPT pokusa, slika 3).

Efektivni kut unutarnjeg trenja dobiven iz DPH pokusa je izveden iz korelacije sa indeksom zbijenosti (HRN EN 1997-2:2012), dok je iz CPT pokusa radi usporedbe izveden iz korelacija po Robertsonu i dr. (1983) te Hatanaka i dr. (1996) za krupnozrnato tlo i Senneset i dr. (1989) za sitnozrnato tlo.



Slika 12. Usporedba efektivnog kuta unutarnjeg trenja (ϕ') dobivenog iz CPT i DPH pokusa

Iz DPH ispitivanja se ne dobivaju kvalitetni podaci za kut unutarnjeg trenja u sitnozrnatom materijalima zbog čega on nije interpretiran za sloj gline na dubini 8 – 10 m te na slici 12 na spomenutoj dubini poprima vrijednost 0°. Na slici 12 je vidljivo da u sloju pijeska do dubine 8 m korelacijom preko DPH ispitivanja dobivamo manje vrijednosti kuta unutarnjeg trenja u odnosu na korelacije dobivene preko CPT ispitivanja, dok nakon 10 m dubine, gdje završava sloj gline, vrijednosti kuta unutarnjeg trenja dobivenih preko DPH postaju nešto veće. Do povećanja dolazi uslijed povećanja trenja prilikom penetracije između gline i površine oboda šipki, što utječe na interpretaciju rezultata i ukazuje na određeni nedostatak kada se između dva sloja krupnozrnatog materijala nalazi sloj gline.

4.7. CPT – DPH korelacija

Iako postoji veliki broj korelacija između statičkih i dinamičkih penetracijskih pokusa, one se uglavnom odnose na korelacije između statičkog i standardnog (SPT) pokusa. U literaturi (HRN EN 1997-2:2012; Czado & Pietras 2012; Lunne i dr. 1997; Mahler & Szendefy 2009) je pronađen vrlo mali broj CPT-DPH korelacija i one se uglavnom odnose na krupnozrnata tla ili su usko vezane za određene lokacije.

Biedermann (1984) je ustanovio linearnu zavisnost između otpora na šiljku q_c i broja udaraca za razne vrste di-

namičke penetracije (Mahler & Szendefy 2009). Ovi koeficijenti su ovisno o vrsti tla za tešku udarnu sondu prikazani u tablici 1.

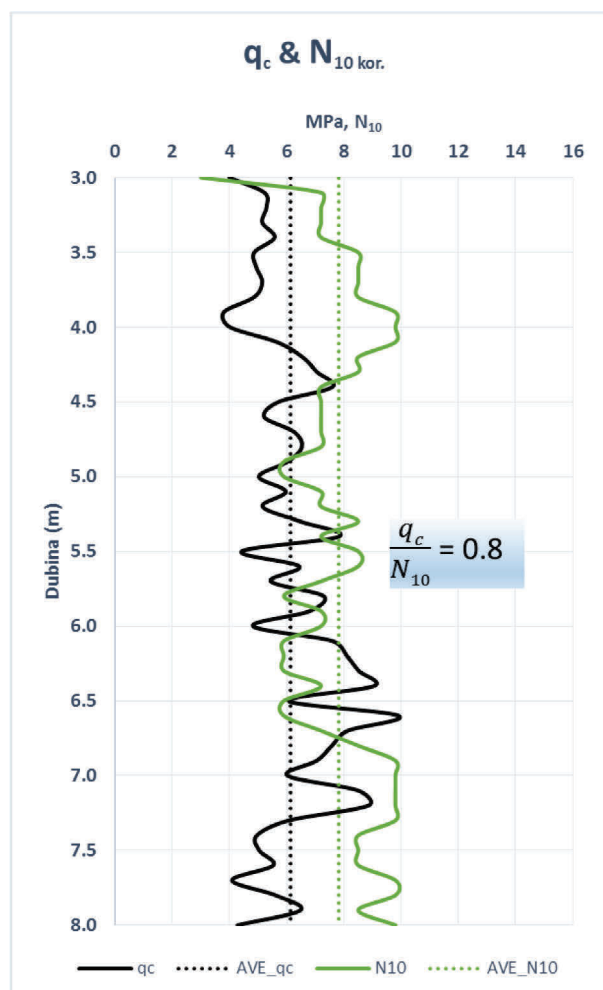
Tablica 1. CPT-DPH korelacija prema Biedermannu (Mahler & Szendefy 2009)

Vrsta tla	q_c/N_{10}
Slabo graduirani pijesak	0.7
Dobro graduirani pijesak	1.0
Šljunkoviti pijesak	1.5
Glina	1.0

Na slici 13 je prikazana CPT-DPH korelacija izvedena sa rezultatima ispitivanja temeljnog tla, za sloj jednoliko graduiranog pijeska ispod razine podzemne vode, od 3 - 8 m dubine (slika 4). Izračunate su srednje vrijednosti otpora na šiljku q_c i broja udaraca $N_{10, kor.}$ te je dobiven slijedeći omjer:

$$\frac{q_c}{N_{10, kor.}} = 0.8 \quad (7)$$

gdje je q_c – izmjereni otpor na šiljku sonde, a $N_{10, kor.}$ korigirana vrijednost broja udaraca potrebnih za penetraciju teške udarne sonde 10 cm. Korekcija je provedena zbog utjecaja podzemne vode prema izrazu 5.



Slika 13. CPT-DPH korelacija

Uočava se podudaranje s korelacijom prema Biedermannu za slabo gradiirani pijesak za kojeg omjer iznosi 0,7.

5. ZAKLJUČAK

Statički penetracijski pokus (CPT) je zbog svojih prednosti i mogućnosti primjene u gotovo svim vrstama tla jedna od najčešće primjenjivanih metoda in-situ ispitivanja tla. U radu su prikazani rezultati ispitivanja temeljnog tla statičkom penetracijom u kombinaciji s ispitivanjem teškom udarnom sondom. Općenito je preporuka da se prilikom ispitivanja tla kombiniraju najmanje dvije metode. Generalno se rezultati ispitivanja podudaraju s rezultatima dobivenim istražnim bušenjem. Određeno odstupanje uočeno je na dubini 8 – 10 m, gdje rezultati CPT i DPH pokusa ukazuju na prisustvo gline, a koja nije detektirana istražnim bušenjem. Razlog tome je bočno istiskivanje gline izvan jezgre cijevi prilikom bušenja.

Usporedbom kuta unutarnjeg trenja dobivenog iz korelacija sa CPT i DPH ispitivanjem uočeno je da DPH daje manje vrijednosti kuta unutarnjeg trenja u sloju pijeska do 8 m dubine, dok vrijednosti na dubini 10 m gdje završava sloj gline i započinje sloj pijeska postaju nešto veće. Do povećanja kuta unutarnjeg trenja dolazi uslijed povećanja trenja između gline i oboda šipki, što utječe na interpretaciju rezultata.

Izvedena je linearna zavisnost između otpora na šiljku (q_c) statičkog penetracijskog pokusa i korigiranog broja udaraca teške udarne sonde potrebnih za penetraciju 10 cm ($N_{10, kor}$). Dobiven je slijedeći omjer za jednoliko gradiirani pijesak: $q_c/N_{10, kor} = 0,8$. Dobiveni omjer se podudara s korelacijom prema Biedermannu. Detaljnija analiza navedene korelacije prelazi opseg i namjenu rada te stoga ona nije provedena.

6. LITERATURA

Cope M (2011) Dynamic probe theory revisited – effective interpretation of dynamic test results, Formerly of Geotek Services Limited, Auckland, New Zealand

Czado B, Pietras J S (2012), Comparison of the cone penetration resistance obtained in static and dynamic field tests, AGH Journal of Mining and Geoengineering 36 1 97-105

Hatanaka M, Uchida A (1996), Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils, Soils and foundations, 36 4 1-9

HRN EN 1997-2:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje- 2.dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla

HRN EN ISO 22476-2:2008 Geotehničko istraživanje i ispitivanje- Terensko ispitivanje- 2.dio: Dinamička penetracija

HRN EN ISO 22476-2:2005/A1:2011, Geotehničko istraživanje i ispitivanje- Terensko ispitivanje- 2.dio: Dinamička penetracija – Amandman 1

Lunne T, Robertson P K, Powell J J M (1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Spon Press, London

Mahler A, Szendefy J (2009), Estimation of CPT resistance based on DPH results, Periodica Polytechnica, 53 2 101-106

NovoCPT User's Manual (2009), Novo Tech Software Ltd., North Vancouver, Canada

Robertson P K (2012), Guide to Cone Penetration Testing, California

Robertson P K, Campanella R G (1983) Interpretation of cone penetration tests, part I: sand, Canadian Geotechnical Journal, 20 4 718-733

Senneset K, Sandven R, Janbu N (1989) Evaluation of soil parameters from piezocone tests: Transportation Research Record no. 1235 24-37

PROCJENA ODZIVA TLA MJERENJEM MIKROSEIZMIČKOG NEMIRA U GRADU VARAŽDINU

ASSESSMENT OF SITE EFFECTS USING MICROTREMOR MEASUREMENTS IN VARAŽDIN CITY

Davor Stanko^{1*}, Stjepan Strelec¹, Mario Gazdek¹, Alen Filipović¹, Nikola Kaniški¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA,

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: stankodavor@gmail.com

Sažetak: Na jačinu podrhtavanja tla na nekoj lokaciji za vrijeme potresa osim njegove magnitude i udaljenosti spomenute lokacije od epicentra potresa, utječu i efekti lokalnog tla. Prilikom širenja seizmičkih valova kroz tlo dolazi do amplifikacije (engl. amplification) seizmičke pobude od osnovne stijene (engl. bedrock) do površine tla (engl. surface ground). Metoda mjerenja mikro seizmičkog nemira, tzv. HVSR metoda (engl. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), u posljednja dva desetljeća pokazala se kao brza i jednostavna metoda za istraživanje odziva tla, tj. za određivanje rezonantne frekvencije tla i faktora amplifikacije. Mikro seizmički nemir može se definirati kao stalno podrhtavanje tla Zemlje uzrokovano prirodnim (vjetar, oceanski valovi, daleki potresi, ciklone i anticiklone) i umjetnim (promet, industrijski strojevi) izvorima. U ovom radu prikazan je princip metode mjerenja mikro seizmičkog nemira u procjeni odziva tla na području grada Varaždina. Rezultati mjerenja su uspoređeni s postojećim bušotinama u u gradu i izvan grada. Uočena je veoma jaka povezanost između geološke strukture i izmjerenih frekvencija i amplifikacija lokalnog aluvijalnog tla. HVSR metoda pogodna je za brzu i efikasnu procjenu rezonantne ili osnovne frekvencije tla f_0 te procjenu amplifikacije $HVSR(f) = A(f)$ u području niske seizmičnosti poput grada Varaždina. Procjena odziva lokalnog tla veoma je važno kod urbanog planiranja, procjene seizmički opasnih zona u gradskim područjima, za aseizmičko projektiranje, kao i za potencijalnu seizmičku procjenu obnove povijesnih građevina.

Ključne riječi: mikro seizmički nemir, odziv tla, rezonantna frekvencija tla, faktor amplifikacije, urbano planiranje

Abstract: A local site effect also affects intensity of soil vibration during an earthquake except of magnitude and epicenter distance from earthquake. When seismic wave propagates through soil, it comes to the amplification of seismic ground motion from bedrock to ground surface soil. In the last two decades, microtremor measurements method, e.g. HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) has been showed as fast and simple method for assessment of local site effects, i.e. determination of resonant soil frequencies and soil amplification factors. Microseismic noise can be defined as a continuously Earth tremor caused by natural (wind, ocean waves, long earthquakes, cyclones and anticyclones) and artificial (traffic, industrial machines) sources. In this paper we demonstrate use of microtremor measurement method for assessment of local site effect in Varaždin city. Given results are compared to the existed boreholes inside and outside the city and a strong correlation have found between geological structure and measured frequencies and amplifications of local alluvial soil. HVSR method proved to be useful for fast and efficient assessment of resonant soil frequency f_0 and soil amplification $HVSR(f) = A(f)$ in an area of low seismicity like Varaždin city. Assessment of local site effects is very important for urban planning, assessment of seismic danger zones in city area, for aseismic building construction, and also for potential seismic evaluation of historical building retrofitting.

Keywords: microtremor, site effects, resonant frequency of soil, amplification factor, urban planning

Received: 05.05.2015 / Accepted: 28.05.2015

Published online: 19.06.2015

Pregledni rad / Review paper

1. UVOD

Na oštećenja nastala na nekoj lokaciji osim magnitude potresa i udaljenosti epicentra od potresa, utječu i efekti lokalnog tla, pri čemu dolazi do amplifikacije seizmičke pobude od osnovne stijene do površine tla. Primjer takvog utjecaja efekata lokalnog tla i same amplifikacije seizmičke pobude je veliki potres 1985. u Meksiku magnitude $M_w = 8,3$ (slika 1). U tom potresu stradalo je više od 10 000 ljudi i nastala su oštećenja veća od 6 milijardi dolara. Područje s najvećim oštećenjima izgrađeno je na mekim aluvijalnim sedimentima prahistorijskog jezera udaljeno čak 400 km od epicentra potresa u Camposu. Zbog mekih površinskih sedimenata aluvijalnog tla došlo je do amplifikacije seizmičke pobude

što je uzrokovalo jako podrhtavanje tla, u odnosu na lokaciju izgrađeno od vulkanskih stijena gdje nije došlo do amplifikacije tla (Bard, 2011; Reiter, 1990). Ono što je zanimljivo, da se nekoliko kilometara dalje, na vulkanskim stijenama, potres jedva osjetio, bez ljudskih života i sa malo štete-prigušenje seizmičke pobude zbog udaljenosti.

Posljednjih nekoliko desetljeća u svrhu prevencije i zaštite od potresa definiranje seizmičkog hazarda i seizmičkog rizika postalo je standardno u prostornim i urbanističkim planovima. Kombinacijom seizmičko-geofizičko-geotehničko-geološkog istraživanja mogu se definirati parametri potrebni za protupotresnu gradnju, kao i za definiranje potencijalnih rizika oštećenja od potresa.

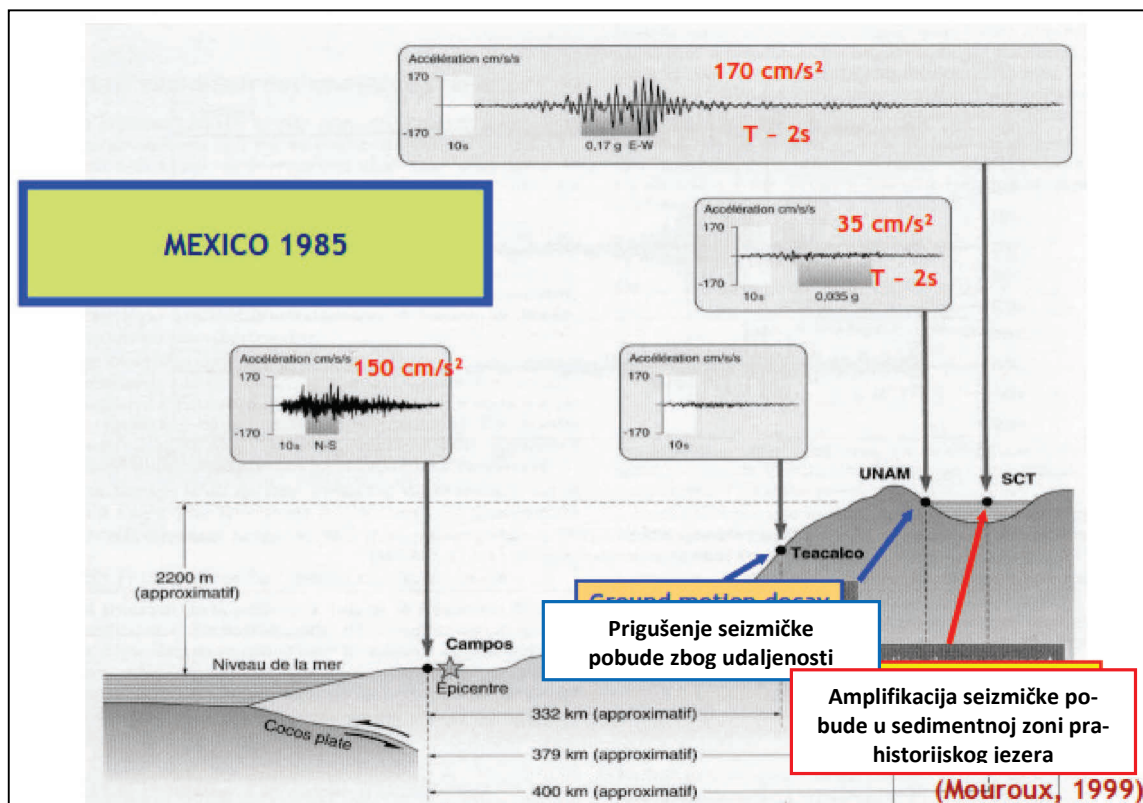
Procjena lokalnih uvjeta tla važna je da bi se odredile karakteristike gibanja površinskih slojeva tla uslijed djelovanja potresa.

Metoda mjerenja mikro seizmičkog nemira, tzv. HVSR metoda (engl. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), u posljednja dva desetljeća pokazala se kao brza i jednostavna metoda za istraživanje odziva tla, tj. za određivanje rezonantne vlastite (osnovne) frekvencije tla i faktora amplifikacija (Bard, 1998; Herak et al., 2011;

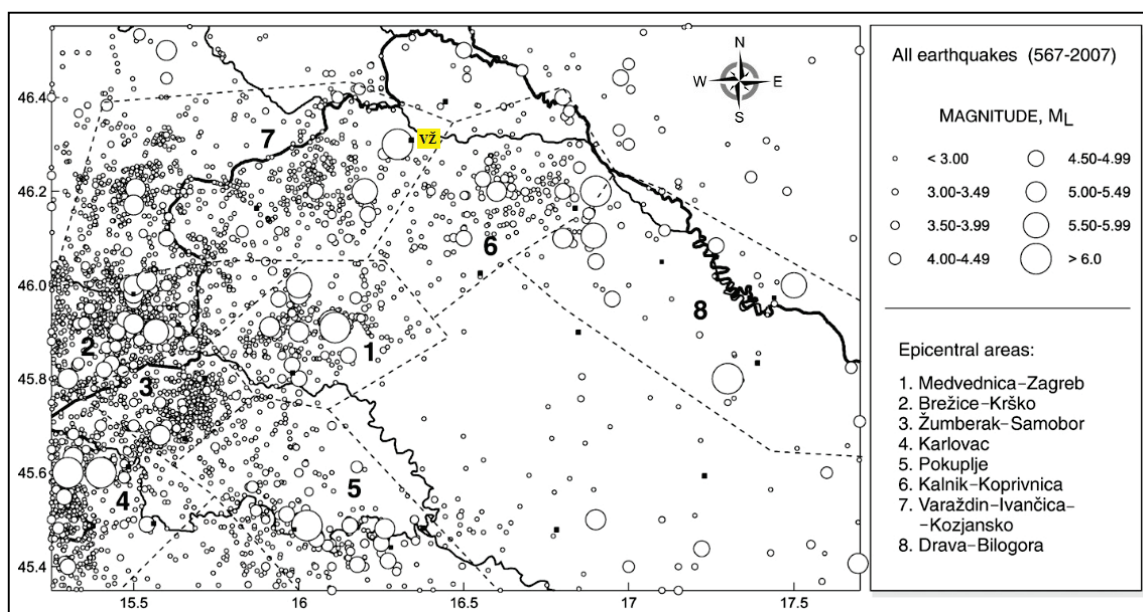
Gosar et al., 2007; Mucciarelli i Gallipolli et al., 2001; Nakamura, 1989; SESAME guidelines, 2004).

U ovom radu prikazani su rezultati mjerenja mikro seizmičkog nemira na području grada Varaždina. Dobiveni rezultati mjerenja uspoređeni su sa postojećim bušotinama u gradu.

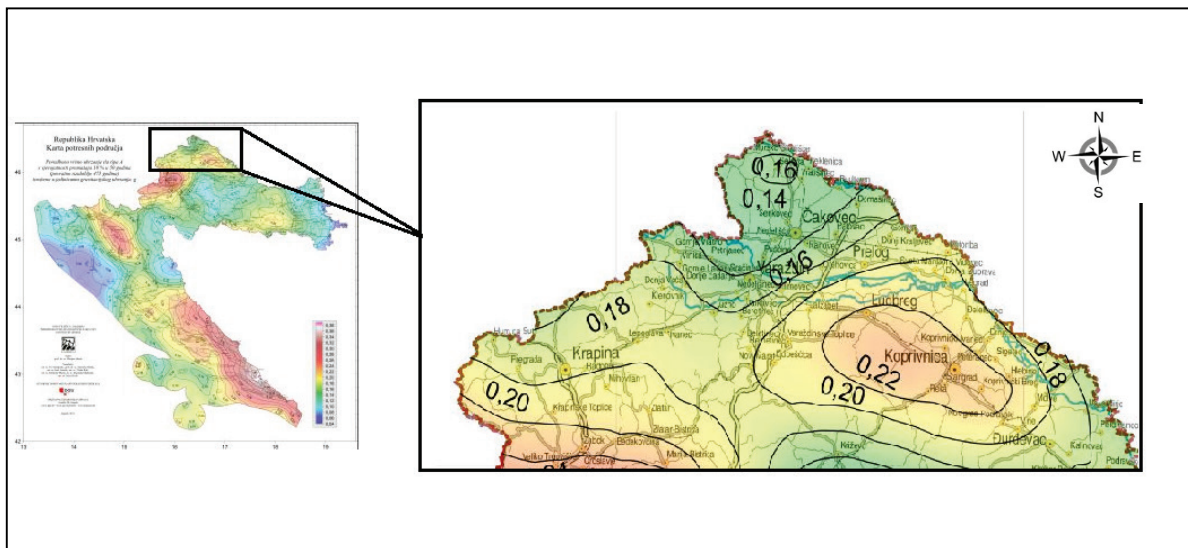
HVSR metoda mjerenja mikro seizmičkog nemira pogodna je za brzu procjenu odziva lokalnog tla u seizmički neaktivnim područjima.



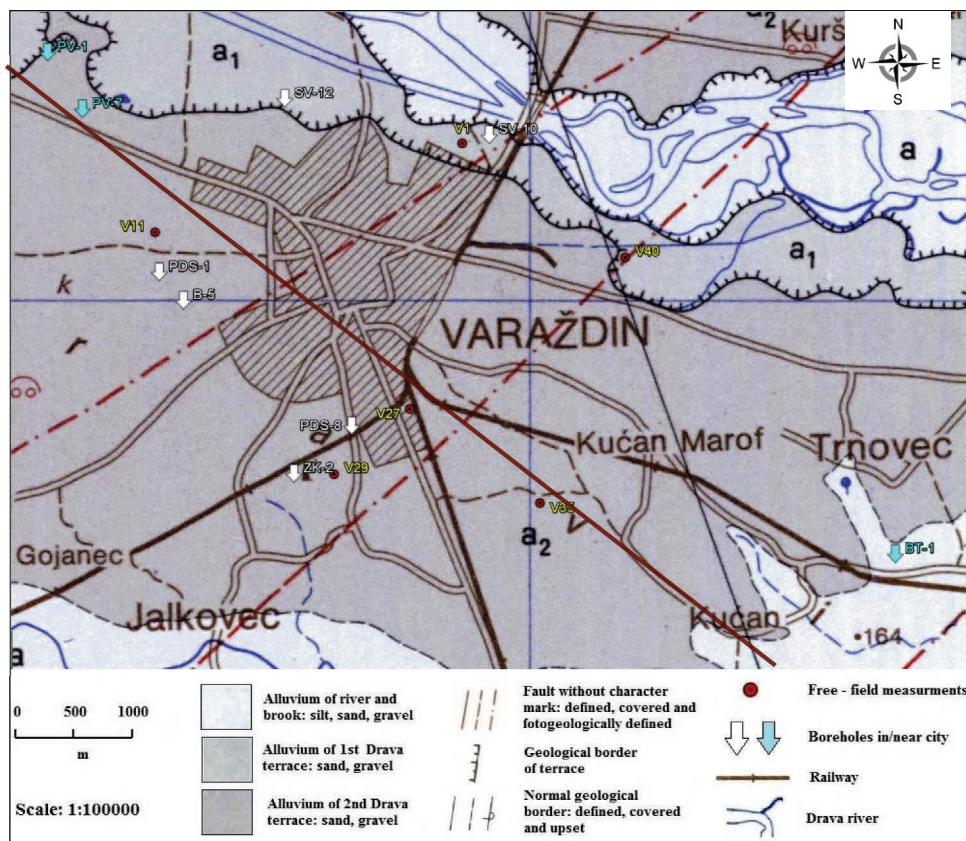
Slika 1. Primjer amplifikacije seizmičke pobude na potresu u Mexicu 1985.godine (preuzeto iz Bard, 2011)



Slika 2. Epicentri svih potresa (567-2007) prema katalogu potresa Republike Hrvatske. Epicentralno područje Varaždin-Ivančica-Kozjansko označeno je u legendi brojem 7. Grad Varaždin označen je žutom bojom (preuzeto iz Herak et al., 2009)



Slika 3. Poredbeno vršno ubrzanje tla tipa A s vjerojatnosti premašaja 10 % u 50 godina za povratno razdoblje 475 godina izraženo u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g, (<http://seizkarta.gfz.hr>)



Slika 4. Geološka karta područja grada Varaždina zajedno sa točkama mjerenja mikro seizmičkog nemira i lokacijama bušotina (modificirano prema Šimunić i sur., 1982.god)

2. SEIZMOLOŠKO GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE VARAŽDINA

Varaždin kao barokni grad ima puno povijesnih građevina koje su posebno osjetljive na podrhtavanja tla, kako od potresa, tako i od umjetno induciranih potresa s obzirom na povijesne načine gradnje i dotrajalost materijala s godinama.

U prošlosti grad Varaždin pogodilo je par jakih potresa, 1459 godine potresa intenziteta $I_0=IX^0MCS$ (Mercalli-Calcani-Sieberg) i neidentificirani potres 1776 godine za kojeg se smatra da je bio uzrok velikog požara koji je uništio grad. U posljednja tri desetljeća blizu Varaždina dogodilo se nekoliko potresa: 16.3.1982 potres u Ivancu magnitude $M_L=4,5$; 1.6.1993.g potres u Varaždinskim Toplicama magnitude $M_L=4,7$; potres blizu Novog Marofa

7.12.2005.g magnituda $M_L=3,6$. Epicentralno područje Varaždin-Kozjansko-Ivančica zajedno sa epicentrima potresa SZ Hrvatske prikazani su na slici 2 (Herak et al., 2009).

Prema karti potresnih područja Republike Hrvatske (slika 3), poredbeno vršno ubrzanje tipa tla A za povratno razdoblje 475-godina iznosi 0,16g (Herak et al., 2011.).

Geologija područja grada Varaždina dobro je poznata zahvaljujući brojnim istraživanjima varaždinskog vodonosnika. Varaždinski vodonosnik zauzima krajnji zapadni dio heterogenih naslaga dravske doline. Geološki sastav površinskih naslaga u Varaždinskoj depresiji kao i južna rubna područja depresije istraživao je Šimunić et al. (1982) čiji rezultat je geološka karta prikazana na slici 4. U Varaždinskoj depresiji teško je odvojiti pliocenske naslage od kvartarnih, donjopleistocenskih naslaga. Sličnog su sastava. Većinom je to višestruka izmjena gline, šljunka i pijeska. Varaždinski vodonosnik izgrađen je od šljunka i pijeska vjerojatno srednje i gornjopliocenske, te holocenske starosti. U njima se rijetko pojavljuju sitnije frakcije (gline i prah) i to uglavnom kao tanke leće i proslojci u središnjim dijelovima. Vodonosnik je izdužen paralelno toku Drave, a debljina mu se povećava od zapada prema istoku.

Tektonski gledajući, Varaždinsko područje je pod utjecajem četiri rasjedna sustava (Duić i Urumović, 2007; Herak et al., 2009; Prelogović i Velić, 1988; Urumović et al., 1990): a) Dravski rasjed u smjeru NW-SE prikazan na geološkoj karti kao geološka granica širine 0,5-6 km, b) fotogeološki definirani rasjedi s pružanjem ENE-WSW prema Ivančici prikazani na geološkoj karti sa crtanim crvenim linijama, te c) Varaždinski rasjed pružanjem WNW-ESE (struktura Ormož-Varaždin).

3. LOKALNI UVJETI TLA

Efekti lokalnih uvjeta tla na određenim lokacijama za vrijeme potresa mogu uzrokovati puno veću štetu u odnosu na neki potres koji se dogodio u blizini, upravo zbog amplifikacije seizmičke pobude.

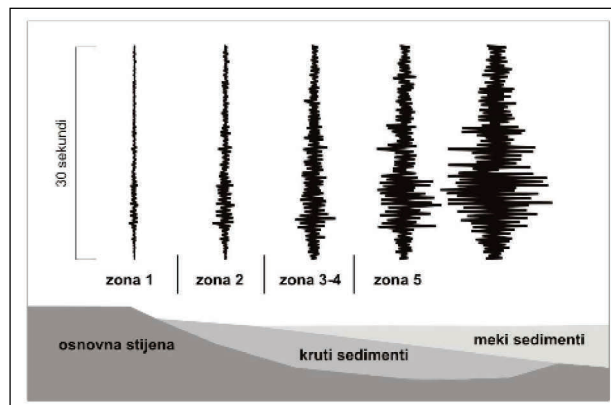
Primjer amplifikacije seizmičke pobude od osnovne stijene do površine tla prikazano je na slici 3 (Seville i Metcalfe, 2005). Meki sedimenti tla jače amplificiraju seizmičku pobudu od osnovne stijene, nego kruti sedimenti. Meki površinski sedimenti zarobljavaju seizmičku energiju (zbog očuvanja energije) zbog razlike u impedanciji između mekog površinskog sloja i osnovne stijene (engl. bedrock), te pri tom dolazi do amplifikacije seizmičke pobude, relacija 1 (Elnashi i Sarno, 2008).

$$A_0 = C = \frac{V_{\text{bedrock}} \cdot \rho_{\text{bedrock}}}{V_{\text{površina}} \cdot \rho_{\text{površina}}} \quad (1)$$

Impedancija tla je otpor titranju čestice tla ili stijene (Aki i Richards, 1980) i definira se kao umnožak gustoće tla i brzine širenja transverzalnih valova. Prolaskom seizmičkog vala kroz područje povećane površinske impedancije tla, otpor titranju čestice tla se također povećava, te dolazi do smanjenja amplitude seizmičkog vala, ili obrnuto, ako prolazi kroz područje smanjenja

površinske impedancije tla, dolazi do povećanja amplitude seizmičkog vala. Amplituda titranja (podrhtavanja) tla za vrijeme potresa može se povećati ili smanjiti ovisno o geološkoj strukturi tla (debljina sedimenata, dubina od osnovne stijene, razina podzemne vode) kroz koje seizmički valovi putuju.

Na amplifikaciju seizmičke pobude utječe i apsorpcija energije, tj. atenuacija ili prigušenje amplitude valova uzrokovana neelastičnošću i heterogenošću sustava.



Slika 5. Lokalni uvjeti tla – primjer amplifikacije seizmičke pobude od osnovne stijene do površine tla (prema Seville i Metcalfe, 2005).

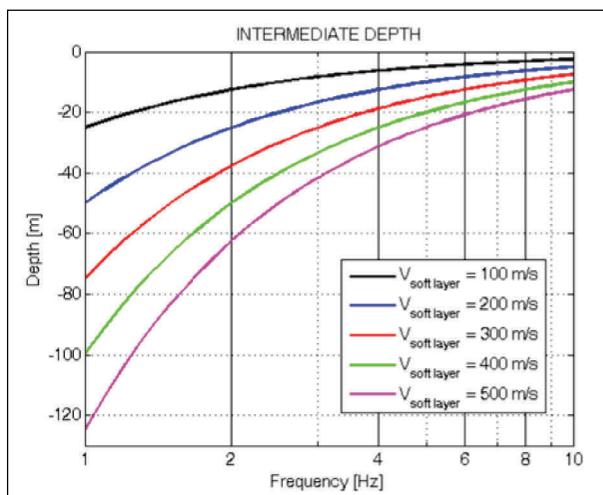
Pojava rezonancije događa se prilikom širenja seizmičkog vala u gornje površinske slojeve tla ili stijena pri čemu dolazi do pojave reverberacije seizmičkog vala. Maksimalna rezonancija događa se za valove čije su valne duljine četiri puta debljine (h) sloja u kojem je seizmički val zarobljen. Za transverzalne valove (V_s), frekvencija koja je najviše amplificirana, tj. vlastita ili rezonantna frekvencija f_0 može se definirati:

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \quad (2)$$

Mnoga prijašnja istraživanja (Bard, 1998; Bonnefoy-Claudet et al., 2004; Gosar et al., 2007; Ibs-von Seht and Wohlenberg, 1999; Leyton et al., 2013) pokazala su jaku povezanost između površinske geologije i mikro seizmičkog nemira. Prema relaciji 2 može se odrediti dubina mekog površinskog sloja sedimenata iznad osnovne stijene uzimajući uz pretpostavku brzine transverzalnih valova V_s (slika 6).

Poznavanje rezonantne (osnovne ili vlastite) frekvencije osciliranja tla f_0 i amplifikacije tla A_0 , uz poznavanje vlastitih frekvencija građevina, može se procijeniti opasnost ugroženosti pojave rezonancije tlo – građevina za vrijeme potresa. Procjena lokalnih uvjeta tla stoga je veoma bitno prilikom definiranja parametara za protupotresnu gradnju i definiranje potencijalnih rizika oštećenja od potresa.

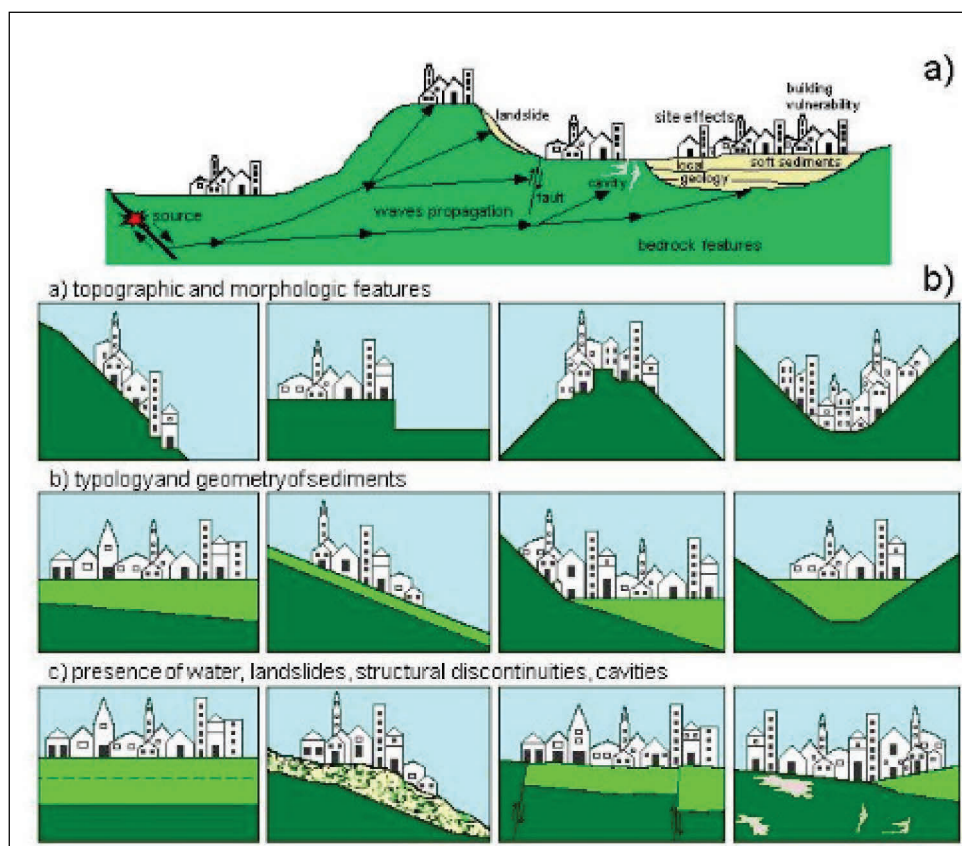
Na slici 7 prikazani su razni faktori lokalnih uvjeta tla koji mogu utjecati na rasprostiranje seizmičkog vala od izvora (epicentra) do površine tla: a) topografija i morfologija terena, b) tipologija i geometrija mekih sedimenata, c) prisutnost vode, klizišta, strukturnih diskontinuiteta i šupljina (Panzer et al., 2013).



Slika 6. Određivanje dubine sedimenata iznad osnovne stijene na temelju izmjerenih vlastitih frekvencija tla (preuzeto iz Micromed: The short Tromino how to manual)

4. MIKROSEIZMIČKI NEMIR

Mikroseizmički nemir može se definirati kao stalno podrhtavanje tla Zemlje uzrokovano prirodnim (vjetar, oceanski valovi, daleki potresi, ciklone i anticiklone) i umjetnim (promet, industrijski strojevi) izvorima. Relativno niske frekvencije (0,1 do < 1 Hz) prirodnog su porijekla (engl. microseismic) – tzv. daleki izvori, dok više frekvencije (0,5 do > 10 Hz) imaju svoje porijeklo od ljudske aktivnosti (engl. microtremor) – tzv. bliski izvori. Valno polje koje uzrokuje pojavu mikro seizmičkog nemira može se objasniti pomoću prostornih (P-longitudinalni i S-transverzalni) i površinskih (R-Rayleigh i L-Love) valova. Nakamura, (1989, 2000) objašnjava mikro seizmički nemir rezonancijom prostornih S valova, dok Bard (1998) objašnjava to pomoću površinskih valova, tj. frekventnom ovisnošću eliptičnosti Rayleighevih valova. Bonnefoy-Claudet et al (2004) dali su zaključak da se valno polje mikro seizmičkog nemira sastoji i od prostornih i površinskih valova.



Slika 7. Primjer kako razni faktori lokalnih uvjeta tla mogu utjecati na rasprostriranje seizmičkog vala od izvora do površine tla (preuzeto iz Panzera et al., 2013)

Metoda mjerenja mikro seizmičkog nemira, tzv. HVSR metoda (engl. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), u posljednja dva desetljeća pokazala se brza i jednostavna metoda za istraživanje odziva tla, tj. za određivanje rezonantne frekvencije tla i faktora amplifikacije.

Nakamura (1989) definira rezonantni amplitudni HVSR vrh $A(f)$ kao spektralni omjer horizontalnih komponenti (F_{NS} i F_{EW}) i vertikalne komponente (F_V) kao:

$$A(f) = HVSR(f) = \frac{\sqrt{F_{NS}(f) \times F_{EW}(f)}}{F_V} \quad (3)$$

Amplituda $A(f)$ ovisna je o osnovnoj (vlastitoj) frekvenciji osciliranja sedimenata tla i pokazuje kolika je amplifikacija amplitude titranja površinskog tla u odnosu na osnovnu stijenu. Amplituda je ovisna o impedanciji tla između osnovne stijene i površinskih sedimenata tla.

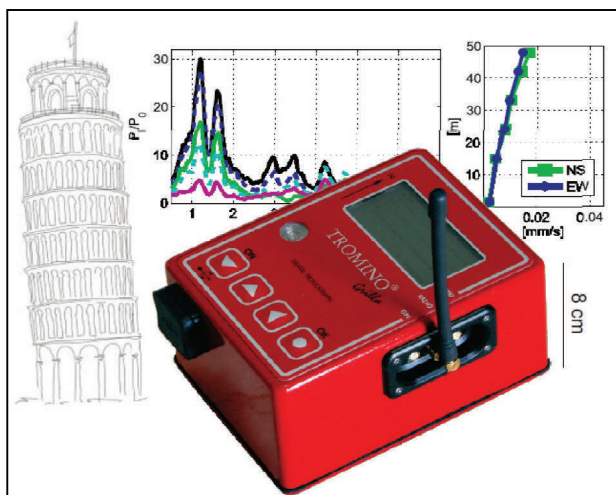
Na temelju mjerenja mikro seizmičkog nemira može se odrediti odziv lokalnog tla iskazan preko vlastite frekvencije tla f_0 i spektralne amplitude $HVSR(f) = A(f)$. Prema slici 6 i relaciji 2 može se procijeniti dubina mekih sedimenata iznad osnovne stijene. Što su frekvencije sedimenata niže, to su meki slojevi deblji, i obrnuto, što su frekvencije više, slojevi su plići.

5. PRINCIP MJERENJA I ANALIZA MIKROSEIZMIČKOG NEMIRA

5.1. Princip mjerenja mikro seizmičkog nemira

Faktor amplifikacije $A(f)$ i osnovna frekvencija f_0 su osnovni parametri za definiranje i kvantificiranje dinamičkog odziva površinskih slojeva tla na seizmičku pobudu. Mjerenja se izvode na slobodnoj površini tla.

Mjerenja su izvršena instrumentom Tromino Engy (Micromed, Italija). Radi se o prijenosnom instrumentu vrlo male mase koji u istom kućištu sadrži trokomponentni visoko-osjetljivi seizmograf sa 10 kanala (3 kanala za mjerenje veoma slabih mikro seizmičkih oscilacija $\pm 1,2$ mm/s, 3 kanala za mjerenje veoma jakih mikro seizmičkih oscilacija ± 50 mm/s, 3 kanala za mjerenja akceleracije tla $\pm 4g$, 1 analogni kanal za trigger), A/D pretvornik, baterije za napajanje, GPS prijemnik signala točnog vremena, te 2 GB Flash-RAM memorije (slika 2). Frekvencije uzorkovanja mogu biti od 128 Hz do 1024 Hz na svim kanalima te 32768 Hz na dva kanala.



Slika 8. Prikaz Tromino ENGY uređaja (Micromed)

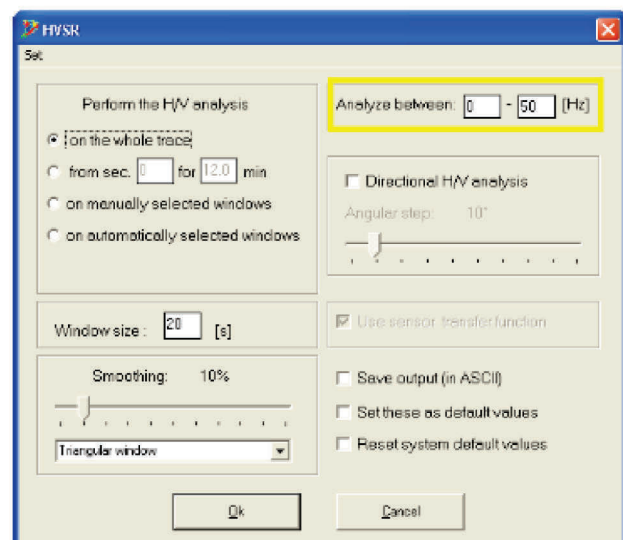
Uređaj se postavlja na slobodnu površinu (engl. free-field) izvan asfaltnih površina, ili na njihovoj granici kako bi se postigao što bolji kontakt sa tlom uz korištenje dugih šiljaka i preciznim niveliranjem. Pri svakom mjerenju uređaj je orijentiran u smjeru geografskog sjevera. Sva mjerenja uzrokovana su na 128 Hz sa duljinom snimanja od 20 minuta.

Područje obuhvaćeno mjerenjima na površini tla je cca. 15 km². Točke mjerenja označena su na slici 6. Mjerne točke pažljivo su odabrane kako bi se izbjegli utjecaji jačih vibracija koja mogu doći od vjetera, visokih stabala

utjecaja zgrada, prometa, pješaka monokromatskih šumova (transformatori, industrijski pogoni), rijeka i slično. Mjerenja su posebno osjetljiva na vremenske uvjete, te se moraju izvoditi u uvjetima bez vjetera jer je potvrđeno da šumovi uzrokovani vjetrom značajno utječu na pouzdanost HVSR analize (Mucciarelli, 2001; SESAME, 2004).

5.2. Analiza mikro seizmičkog nemira

Osnovna priprema podataka i računanje HVSR – spektara napravljeni su računalnim programom Grilla (Micromed) (slika 9). Izmjereni vremenski nizovi mikro seizmičkog nemira tla (slika 10) razdijeljeni su u prozore trajanja od po 20 sekundi, te su uklonjeni oni prozori koji su bili tijekom mjerenja kontaminirani jakim tranzijentima (vjetar, pješaci, promet, industrijski izvor) (slika 11).

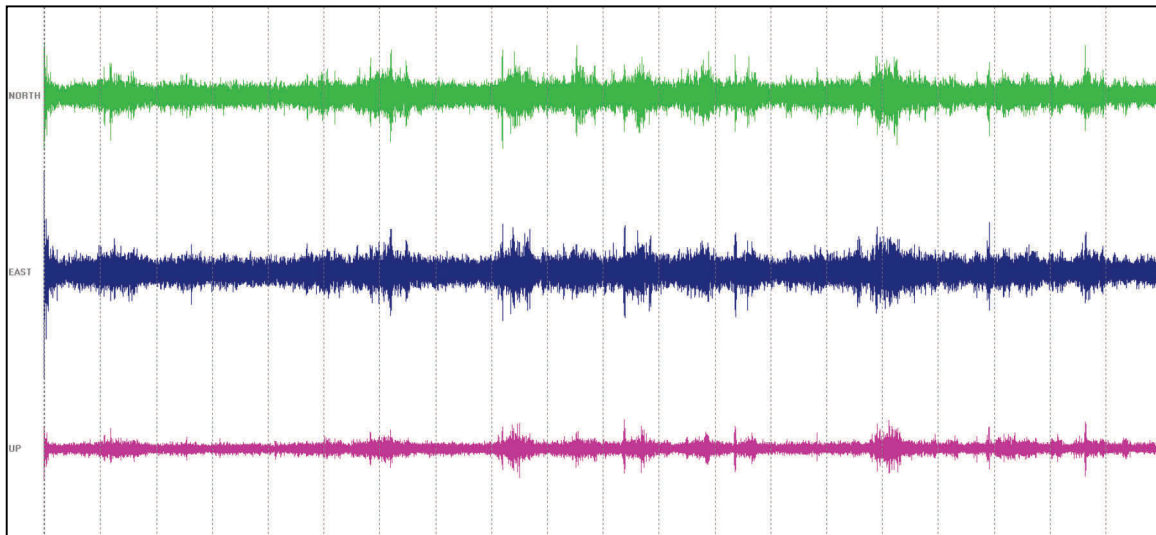


Slika 9. Grilla prozor za analizu (Micromed)

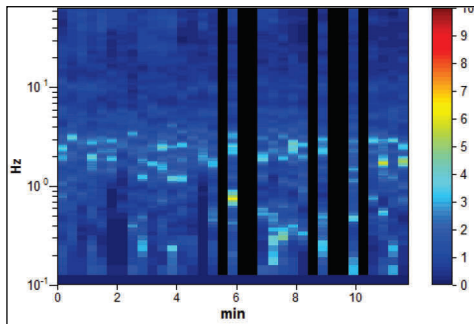
Za svaki prozor HVSR spektri su izračunati kao omjer srednjaka Fouriereovih spektara (slika 11) dviju horizontalnih komponenti (NS i EW), te Fourierovog spektra vertikalne komponente (V). Ti su spektri usrednjeni, te naknadno izgladeni Konno-Ohmachi filtrom prema relaciji 3 (slika 12).

Nakon što su mjerenja mikro seizmičkog nemira analizirana te je dobivena $HVSR(f)$ krivulja, potrebno je provjeriti da li dobivena rezonantna frekvencija tla zadovoljava statističke kriterije prema SESAME (2004) uputama koje su prikazane u Tablici 1. Prva tri kriterija prema SESAME (2004) tablici odnose se na relativnu duljinu vremenskih podjela kao funkcije frekvencijskog rezonantnog vrha f_0 . Sva tri kriterija moraju biti zadovoljena.

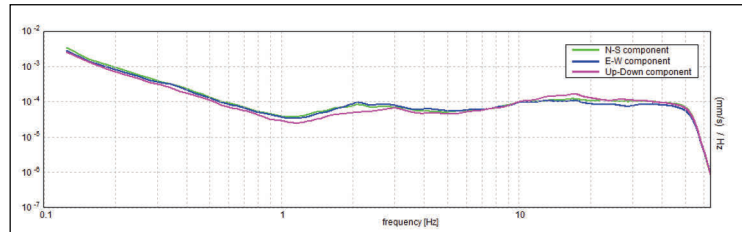
Ostalih 6 kriterija odnose se na statističku značajnost frekvencijskog vrha. Poželjno je da što više kriterija bude zadovoljeno, no čak i ako neki nisu zadovoljeni, ne mora nužno značiti da je HVSR krivulja pogrešna. Kod analiziranja mjerenja na čvrstoj osnovnoj stijeni u principu tih 6 kriterija ne bi zadovoljilo.



Slika 10. Primjer snimke mikro seizmičkog nemira u trajanju od 20 minuta po komponentama (NS, EW, V)



Slika 11. Uklonjene tranzijentne vibracije



Slika 12. Fourierov amplitudni spektar po komponentama

Tablica 1. SESAME (2004) kriteriji za provjeru HVSR(f)

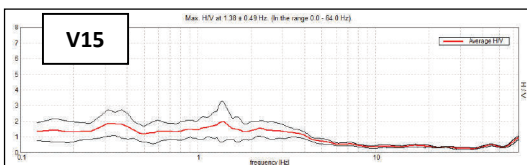
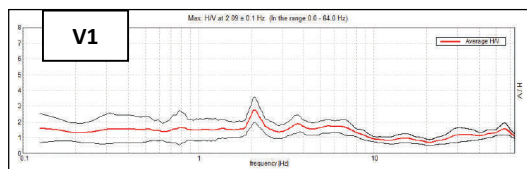
<p>Criteria for a reliable H/V curve</p> <p>i) $f_0 > 10 / l_w$ and</p> <p>ii) $n_c(f_0) > 200$ and</p> <p>iii) $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ OR $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • l_w = window length • n_w = number of windows selected for the average H/V curve • $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ = number of significant cycles • f = current frequency • f_{sensor} = sensor cut-off frequency • f_0 = H/V peak frequency • σ_f = standard deviation of H/V peak frequency ($f_0 \pm \sigma_f$) • $\varepsilon(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ • A_0 = H/V peak amplitude at frequency f_0 • $A_{H/V}(f)$ = H/V curve amplitude at frequency f • f^- = frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$ • f^+ = frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$ • $\sigma_A(f)$ = "standard deviation" of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided • $\sigma_{\log H/V}(f)$ = standard deviation of the $\log A_{H/V}(f)$ curve, $\sigma_{\log H/V}(f)$ is an absolute value which should be added to or subtracted from the mean $\log A_{H/V}(f)$ curve • $\theta(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ • $V_{s,av}$ = average S-wave velocity of the total deposits • $V_{s,surf}$ = S-wave velocity of the surface layer • h = depth to bedrock • h_{min} = lower-bound estimate of h
<p>Criteria for a clear H/V peak (at least 5 out of 6 criteria fulfilled)</p> <p>i) $\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$</p> <p>ii) $\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$</p> <p>iii) $A_0 > 2$</p> <p>iv) $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$</p> <p>v) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$</p> <p>vi) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$</p>	

Threshold Values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

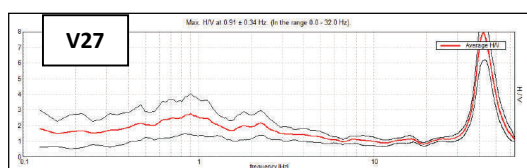
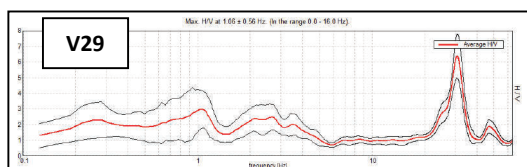
5.3. Rezultati mjerenja na površini tla

Rezultati mjerenja mikro seizmičkog nemira na području grada Varaždina prikazani su na slikama 13a-e. Analizirane *HVSR(f)* krivulje podijelili smo u pet grupa:

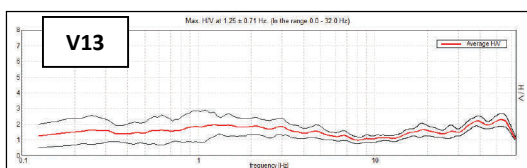
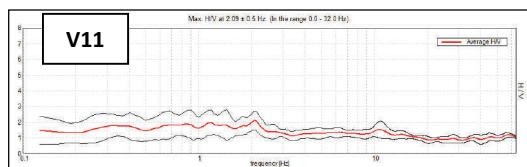
a) Jasni rezonantni HVSR(f) vrh



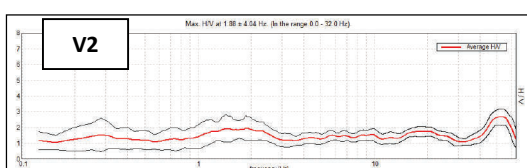
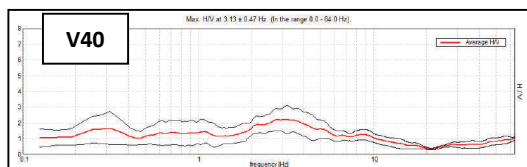
b) Slučaj pojave dva ili više HVSR(f) vrha



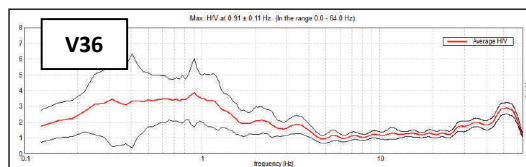
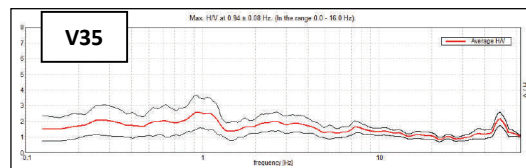
c) Ravni nisko-amplitudni HVSR(f) vrh



d) Široki HVSR(f) vrh



f) Nisko-frekventni HVSR vrh



Slika 13. Primjeri HVSR krivulja. Crvena krivulja označava HVSR(f). Crna krivulja označava standardnu devijaciju.

Slična zapažanja koje se odnose na strukturu frekvencije spektralnih vrhova i HVSR amplitude već je viđen u prijašnjim istraživanjima kao što su: Bard, (1998), Bonnefoy- Claudet, (2004) Gosar, (2007), Herak, (2011); Mucciarelli i Gallipoli, (2001), Nakamura, (1989); SESAME, (2004) i drugi, te su zaključci navedeni u skladu sa njihovim opažanjima.

Visoke ili niske frekvencije povezane su sa debljinom aluvijalnih sedimentnih naslaga iznad osnovne stijene ili čvrstih sedimenata. U aluvijalnim područjima, čvrsti sedimenti su uglavnom cementirani pijesak ili šljunak kod kojih su brzine transversalnih valova V_S veće nego u nadsloju mekih sedimenata. Niske osnovne frekvencije tla ukazuju na deblje sedimente i/ili na iznimno meke materijale. Visoke osnovne frekvencije tla odgovaraju plitkim sedimentima.

Amplituda *HVSR(f)* povezana je sa amplifikacijom mekih sedimenata tla u odnosu na osnovnu stijenu (prema relaciji 1). Amplifikacija tla je u korespondenciji sa razlikom impedancije između slobodne površine tla i potpovršinske strukture. Niski amplitudni HVSR vrhovi odgovaraju manjim razlikama impedancije između površinskih sedimenata (pijesak i šljunak) i osnovne stijene. Visoki amplitudni HVSR vrhovi odgovaraju većim razlikama impedancije između mekih sedimenata i osnovne stijene ili čvrstih sedimenata.

Dva amplitudna HVSR vrha mogu upućivati na lateralnu heterogenost ili na promjenu debljine aluvijalnih slojeva. Prva niža frekvencija (osnovni mod) može ukazivati na deblji pješčani sloj, dok druga viša frekvencija (viši mod) može imati utjecaj lateralne heterogenosti površinske i potpovršinske strukture.

Kod slučaja pojave više HVSR vrhova, obično se govori o osnovnim modovima i višim modovima. Osnovni i viši modovi obično dolaze od potpovršinske kompleksne strukture. Kod pojave veoma niskih frekvencija (< 0,5 Hz) ili veoma visokih frekvencija, obično se radi o pojavi tranzijentnih vibracija (pješači, promet, industrijske smetnje i slično).

Ravni nisko-amplitudni HVSR vrhovi često upućuju na veoma malu razliku između impedancije površinskih sedimenata i osnovne stijene. Može biti pokazatelj osnovne stijene ili polucementiranih/polukonsolidiranih izdanaka i/ili čvrstih sedimenata iznad osnovne stijene. U

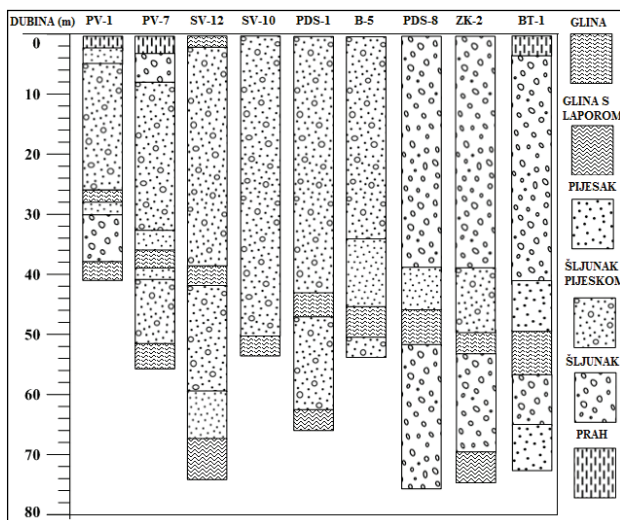
slučaju osnovne stijene, amplituda HVSR vrha bila bi oko $HVSR(f) \approx 1$ (slika 13c).

Široki amplitudni HVSR vrhovi (širok frekvencijski raspon) često mogu odgovarati kompleksnosti potpovršinske strukture-nagnuti slojevi, diskontinuiteti ili tranzicijski slojevi između geoloških cjelina. Rasjedne zone također mogu utjecati na valno polje mikro seizmičkog nemira, a samim time i na rezultate mjerenja.

6. DISKUSIJA REZULTATA

Na temelju analize mikro seizmičkog nemira odredili smo odziv lokalnog tla iskazan preko vlastite frekvencije tla f_0 i spektralne amplitude $HVSR(f)=A(f)$. Prema slici 6 i relaciji 2 može se procijeniti dubina mekih sedimenata iznad osnovne stijene. Što su frekvencije sedimenata niže, to su meki slojevi deblji, i obrnuto, što su frekvencije više, slojevi su plići.

Rezultati mjerenja mikro seizmičkog nemira uspoređeni su sa postojećim bušotinama u gradu Varaždinu i bližoj okolini (izvori bušotina: osobna komunikacija). Bušotine PV-1 i PV-7 (izvor: osobna komunikacija) se nalaze 2 km SZ od gradskog područja, a bušotina BT-1 nalazi se 5 km u smjeru JI iz gradskog područja (izvor: Geotehnički fakultet). Bušotine koje se nalaze u gradskom području su SV-12, SV-10, B-5 (izvor: Urumović, 1990), PDS-8 i ZK-2 (izvor: osobna komunikacija). Pojednostavljene bušotine su prikazane na slici 14.



Slika 14. Pojednostavljene bušotine smještene na području grada Varaždina

Bušotine PV-1, PV-7, PDS-1 i B-5 mogu se usporediti sa HVSR krivuljom V11 ($f_0 = 2,09$ Hz, $A(f) = 2,3$). Uz pretpostavku brzine transverzalnih valova za tipične pijeske-šljunka $V_s \approx 200-300$ m/s, procijenjene dubine sedimenata iznose $h(V11) \approx 24-36$ m. Možemo uočiti da procijenjena dubina odgovara dubini sloja gline debljine 2-3 m koja razdvaja gornji i donji sloj šljunka sa pijeskom. Donji sloj šljunka ponaša se kao čvrsti sediment sa brzinom transverzalnih valova V_s većom od gornjeg sloja. Iz tog razloga možemo i uočiti da amplifikacija nije toliko izražena

zbog male razlike impedancije između dva sloja šljunka sa pijeskom.

Bušotine PDS-8 i ZK-2 mogu se usporediti sa HVSR krivuljama V29 ($f_0 = 1,06$ Hz, $A(f) = 3,0$) i V27 ($f_0 = 0,91$ Hz, $A(f) = 2,8$). Uz pretpostavku brzine transverzalnih valova $V_s \approx 200-300$ m/s, procijenjene dubine sedimenata iznose $h(V29) \approx 47-70$ m i $h(V27) \approx 55-82$ m. Ovdje također možemo uočiti veoma dobro slaganje izmjerenih frekvencija i geološke strukture. Pliće dubine odgovaraju sloju gline debljine 2-3 m koji razdvaja dva sloja šljunka, dok dublje dubine odgovaraju sloju gline sa laporom. Na obje HVSR krivulje možemo vidjeti da postoje dva moda – osnovni mod koji odgovara dubljim slojevima šljunka i viši mod koji je pod utjecajem pliće strukture šljunka sa pijeskom. Amplifikacije iznosi u oba slučaja $A(f) \approx 3$ što opet ukazuje na manju razliku impedancija oba sloja – u ovom slučaju se odnosi na slojeve pijeska i šljunka.

Bušotine SV-10 i SV-12 možemo usporediti sa HVSR krivuljom V1 ($f_0 = 2,09$ Hz, $A(f) = 2,8$). Uz pretpostavku brzine transverzalnih valova $V_s \approx 200-300$ m/s, procijenjene dubine sedimenata iznose $h(V1) \approx 24-36$ m. U ovom slučaju dolazi do manjeg odstupanja procijenjene dubine za ovu HVSR frekvenciju, posebno za bušotinu SV-10 koja je puno bliže mjernoj točki V1 nego SV-12. Uzrok tome može biti neposredni utjecaj rijeke Drave na samo mjerenje mikro seizmičkog nemira, ali i utjecaj geološke strukture s obzirom da se mjerna točka V1 nalazi na geološkoj granici između aluvija rijeke i aluvija prve dravske terase. Mjerna točka V40 se nalazi par stotina metara od mjerene točke V1 i vidimo da su rezultati bitno različiti, tj. za tu točku sedimentni slojevi su još plići s obzirom da je frekvencija veća. Bušotina SV-12 se može usporediti i sa mjernom točkom V11 gdje se rezultati opet podudaraju. Opet možemo uočiti da amplifikacija nije visoka upravo zbog manje razlike impedancija gornjih i donjih slojeva šljunka sa pijeskom.

Bušotina BT-1 koja se nalazi JI od gradskog područja može se usporediti sa mjernom točkom V35 koja pokazuje nisku frekvenciju V1 ($f_0 = 0,94$ Hz, $A(f) = 2,7$). Uz pretpostavku brzine transverzalnih valova $V_s \approx 200-300$ m/s, procijenjene dubine sedimenata iznose $h(V1) \approx 53-80$ m. Opet možemo uočiti dobro slaganje sa bušotinom i geološkom strukturom promatranog područja.

U svim primjerima možemo uočiti dobro slaganje dva sloja: plići mekši sedimentni sloj i dublji čvršći sedimentni sloj kojeg razdvaja sloj gline debljine 2-3m. Očito je da se taj sloj gline zajedno sa dubljim slojevima šljunka sa pijeskom ponaša kao refraktor za valno polje mikro seizmičkog nemira.

7. ZAKLJUČAK

Metoda mjerenja mikro seizmičkog nemira ili HVSR (spektralni omjer horizontalnih i vertikalne komponente) metoda pokazala se kao metoda koje daje dobru procjenu rezonantne ili osnovne frekvencije tla f_0 te procjenu amplifikacije $HVSR(f) = A(f)$ u području niske seizmičnosti grada Varaždina.

Na temelju mjerenja mikro seizmičkog nemira i usporedbe rezultata mjerenja sa postojećim bušotinama u gradu i izvan grada, mogli smo uočiti veoma jaku

povezanost između geološke strukture lokalnog tla i izmjerenih frekvencija i amplifikacija.

HVSR metoda je u prednosti pred ostalim geofizičkim metoda (SASW, MASW, ReMI, seizmička refrakcije/refleksija, ERT) upravo zbog brze neinvazivne procjene lokalnih uvjeta tla preko osnovne frekvencije i amplifikacije tla. Izvodeći mjerenja u dosta gustoj mreži točaka mjerenja mogu se veoma brzo procijeniti seizmički opasna zona u gradskim područjima. Prednost ove metoda osim brzine izvođenja i interpretacije rezultata mjerenja jesu i samo troškovi izvođenja mjerenja kao i niska cijena samih mjerenja.

Naizgled jednostavna i brza metoda koja vuče svoje korijene iz seizmologije, može ujedno i biti veoma komplicirana bez poznavanja kako metoda radi, što sve može utjecati na rezultate mjerenja, te načinu analiziranja rezultata i povezivanje istih rezultata sa geološkim i tektonskim strukturama promatranog područja.

Varaždin kao barokni grad ima puno povijesnih građevina koje su posebno osjetljive na podrhtavanja tla, kako od potresa, tako i od umjetno induciranih potresa s obzirom na povijesne načine gradnje i dotrajnost materijala s godinama.

S obzirom na potresnu povijest na području Varaždinskog područja, kombinacijom seizmičko-geofizičko-geotehničko-geološkog istraživanja mogu se definirati parametri potrebni za protupotresnu gradnju, kao i za definiranje potencijalnih rizika oštećenja od potresa, ali i u svrhu zaštite i obnove povijesnih građevina.

8. LITERATURA

- Aki, K., Richards, P.G., 2009. Quantitative Seismology. University Science Book, California
- Bard, P.-Y., 1998. Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion. Yokohama, Japan, 3. pp. 1251-1279
- Bard, P.-Y., 2011. Ground Shaking site effects. International Training Course 2011 on „Seismology, Seismic Data Analysis, Hazard Assessment and Risk Mitigation“, Potsdam, October 4-6
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, J., Kristek, M., Ohrnberger, M., Wathélet, P.-Y., Bard, D., Fäh, P., Moczo, F., Cotton, 2004. Simulation of seismic ambient vibrations: I. H/V and array techniques on canonical models. 13th world conference in Earthquake Engineering, Vancouver, Paper # 1120
- Duić, Ž., Urumović, K., 2007. Utjecaj legradskog praga na hidrogeološke značajke u području Koprivnice. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, vol.19, pp. 1-10
- Elnashi, A.S., Di Sarno, L., 2008. Fundamentals of Earthquake Engineering. Wiley. UK
- Gosar, A., 2007. Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw 5.6 and 2004 Mw 5.2 earthquakes. Engineering Geology, vol. 91, pp. 178-193
- Herak, D., Herak, M., Tomljenović, B., 2009. Seismicity and earthquake focal mechanism in North-Western Croatia. Tectonophysics, vol. 465, pp. 212-220
- Herak, M., 2011. Overview of recent ambient noise measurements in Croatia in free-field and in buildings. Geofizika, vol. 28, pp. 21-40
- Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I., 2011. Seismic hazard map of Croatia for a 475-year return period (<http://seizkarta.gfz.hr/>)
- Ibs-von Seht, M., Wohlenberg, J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bulletin of the Seismological Society of America., vol. 89, no.1, pp. 250-259
- Leyton, F., Ruiz, S., Sepulveda, S.A., Contreras, J.P., Rebolledo, S., Astroza, M., 2013. Microtremor's HVSR and its correlation with surface geology and damage observed after the 2010 Maule earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curico, Central Chile. Engineering geology, vol. 161, pp. 26-33
- Mucciarelli, M., Gallipoli M.R., 2001. A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. Bolletino di geofisica teorica es applicate, vol. 42, n. 3-4, pp. 255-266
- Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst., vol. 30-1, pp. 25-30
- Nakamura, Y., 2000. Clear identification of the fundamental idea of Nakamura's method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface and its applications, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand
- Panzer, F., Lombardo, G., D'Amico, S., Galea, P., 2013. Speedy Techniques to Evaluate Seismic Site Effects in Particular Geomorphologic Conditions: Faults, Cavities, Landslides and Topographic Irregularities (chapter 5). InTech, pp. 102-138
- Prelogović, E., Velić, J., 1988. Kvartarna tektonska aktivnost u zapadnom dijelu Dravske potoline. Geološki vjesnik, vol. 41, pp. 237 – 253
- Reiter, L., 1990. Earthquake Hazard Analysis. Columbia Univeristy Press, New York
- SESAME 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation. http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23HV_User_Guidelines.pdf
- Seville, E. and Metcalfe, J., 2005. Developing a Hazard Risk Assessment Framework for the New Zealand State Highway Network. Land Transport New Zealand, Report no. 276. pp. 80
- Šimunić A., Pikija M., Hećimović I., 1982. Osnovna geološka karta SFRJ, Varaždin M 1: 100000. HGI Zagreb, Sav. geol. zavod, Beograd
- Urumović, K., Hlevnjak, B., Prelogović, E., 1990. Hidrogeološki uvjeti varaždinskog vodonosnika, Geološki vjesnik, vol. 43, pp. 149-115

IN MEMORIAM

Prof.dr.sc. Vladimir Patrčević (1946. - 2015.)

Zadovoljstvo uoči izlaska trećeg broja časopisa Inženjerstvo okoliša nakratko je zamijenila žalost i bol zbog smrti našeg kolege, prijatelja i dugogodišnjeg djelatnika Vladimira Patrčevića.

Prof.dr.sc. Vladimir Patrčević rođen je 29. studenog 1946. godine u Zagrebu. Bio je u braku sa suprugom Anikom, a otac je sinova Gorana i Dejana.

Diplomirao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 1972. godine. Svoj interes za hidrologiju i hidrološka istraživanja pokazao je odmah nakon uspješnog završetka studija kada se 1972. godine zaposlio u Republičkom hidrometeorološkom zavodu u Zagrebu gdje je radio kao stručni suradnik na hidrološkim mjeranjima do 1974. godine. U razdoblju do 1976. godine svoje stručno usavršavanje je nastavio u projektnom poduzeću TEH Projekt u Rijeci, gdje je u hidro grupi radio kao samostalni i odgovorni projektant.

Svoje nastavno i znanstveno djelovanje započeo je 1976. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu i Građevinskom Institutu, gdje je najprije kao asistent, a zatim kao predavač i viši predavač radio sve do 1991. godine. Za to vrijeme je na Građevinskom fakultetu postigao i znanstveni stupanj magistra tehničkih znanosti. Nakon izdvajanja Građevinskog Instituta 1991. godine ostaje raditi u Institutu građevinarstva Hrvatske, u Zavodu za hidrotehniku, kao zamjenik rukovoditelja Zavoda. U zvanje stručnog savjetnika Instituta građevinarstva Hrvatske izabran je 1992. godine.



Iste godine profesor Patrčević prelazi na Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku gdje se u potpunosti posvećuje znanstveno-nastavnom radu vezanom za hidrotehničko područje. Nakon što je 1995. godine doktorirao na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, najprije je bio izabran u znanstveno nastavno zvanje docenta za područje građevinarstva, znanstvena disciplina hidrotehnika, za predmet Hidrologija na Građevinskom fakultetu u Osijeku, a zatim i u izvanrednog i redovitog profesora. Značajno je istaknuti kako je u tom razdoblju obnašao funkcije prodekana za stručni rad te predstojnika Zavoda za hidrotehniku.

Na Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu prelazi 2008. godine kada je i izabran u najviše znanstveno-nastavno zvanje redovitog profesora u trajnom zvanju. Od svog dolaska na Geotehnički fakultet intenzivno nastavlja prenositi svoje iskustvo i znanje na studente kojima se u potpunosti posvetio. Bio je nositelj više kolegija iz hidrotehničkog područja, a kao profesor i mentor obrazovao je više generacija studenata hidrotehničkog smjera.

U domaćim i međunarodnim znanstvenim i stručnim časopisima, kao i na domaćim i međunarodnim znanstvenim kongresima objavio je brojne radove. Bio je voditelj više znanstveno istraživačkih projekata sufinanciranih od Ministarstva znanosti Republike Hrvatske i Hrvatskih voda od kojih se ističe projekt „Vertikalna bilanca podzemnih voda riječnog aluvija Drave“. Bio je recenzent raznih projekata, studija i sveučilišnih udžbenika, te suradnik i voditelj na mnogobrojnim stručnim projektima iz područja hidrotehnike.

Od svog dolaska na Geotehnički fakultet aktivno je sudjelovao u izradi novog preddiplomskog i diplomskog studijskog programa Inženjerstvo okoliša te je svoje bogato iskustvo ugradio u razvoj smjera Upravljanje vodama. Pred kraj života aktivno se uključio i u izradu doktorskog studijskog programa Geotehničkog fakulteta dajući brojne vrlo kvalitetne sugestije i prijedloge koji će se ugraditi u konačni prijedlog programa.

Svoje iskustvo znanstvenika prenio je i na izdavačku djelatnost Fakulteta posvetivši se pokretanju časopisa Inženjerstvo okoliša u kojem je bio i glavni urednik.

Dragi Vlado, iskreno smo Ti zahvalni za tvoje doprinose u koje si ugradio svoje nastavne, znanstvene, stručne i ljudske kvalitete u svakodnevnicu i razvoj našeg Fakulteta na ponos svoje drage obitelji, akademske zajednice i svoje domovine Hrvatske.

Neka je vječna hvala i slava profesoru Vladimiru Patrčeviću!

Djelatnici Geotehničkog fakulteta



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET
ZAVOD ZA HIDROTEHNIKU

DJELATNOSTI ZAVODA ZA HIDROTEHNIKU:

Nastava:

Preddiplomski i diplomski studijski program
«Inženjerstvo okoliša»

Međunarodni doktorski studij
«Geo-Engineering and Water Management»

Poslijediplomski specijalistički
studij «Ekoinženjerstvo»

Znanstvena istraživanja:

Iz područja upravljanja i zaštite podzemnih i površinskih voda

Stručni rad:

Zaštita krških vodonosnika
Vodoistražni radovi

Upravljanje površinskim i podzemnim vodama

Hidrogeološka, hidrološka i inženjerskogeološka istraživanja

Hidrogeokemijske analize i istraživanja

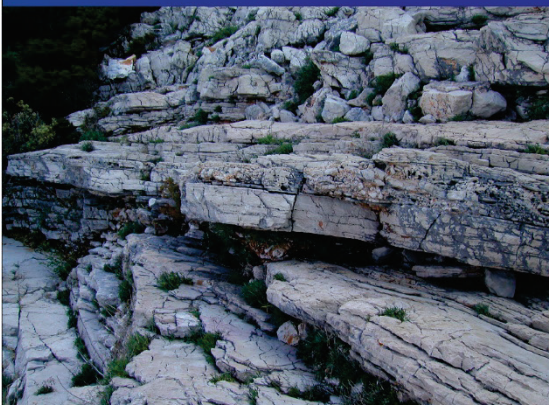
Agrokemijske analize tla

Geografski informacijski sustav

Izrada karata prirodne ranjivosti vodonosnika

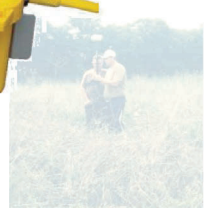
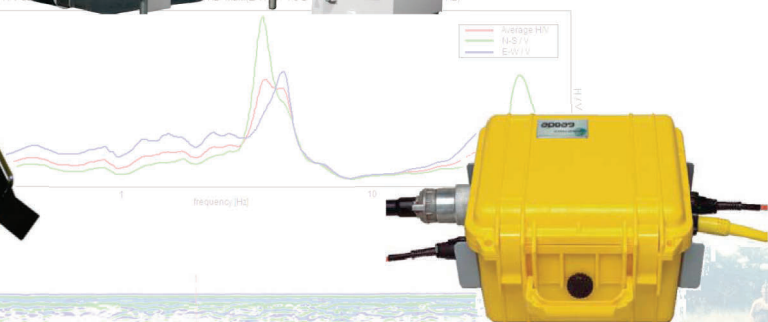
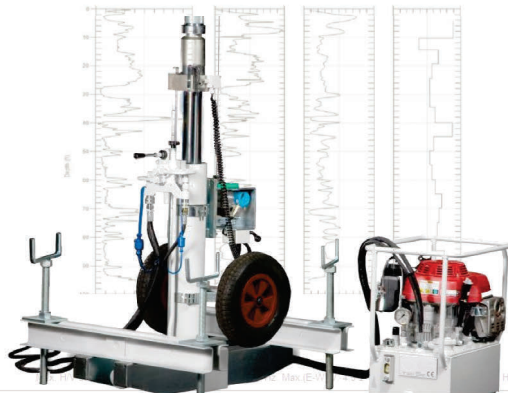
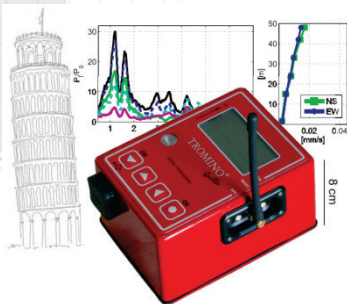
U sklopu Zavoda djeluje **Laboratorij za geokemiju okoliša**
akreditiran prema normi HRN ISO 17025-2007

Varaždin, Hallerova aleja 7, Tel: +385 (0) 42 408 900, Fax: +385 (0) 42 313 587
e-mail: rbiondic@gfv.hr, www.gfv.unizg.hr





ZAVOD ZA GEOTEHNIKU GEOFIZIČKO-GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADovi



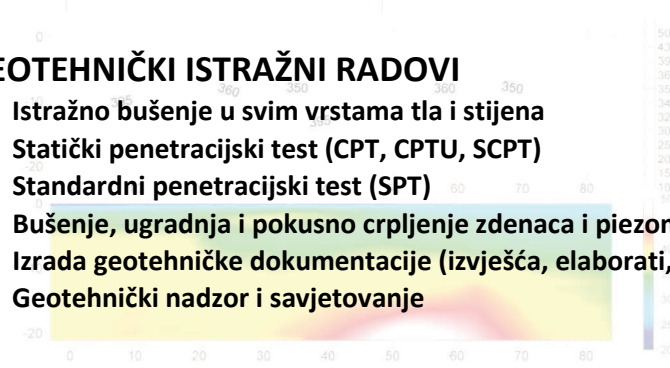
GEOFIZIČKI ISTRAŽNI RADovi

- Geoelektrična istraživanja (sondiranje, profiliranje, tomografija)
- Seizmička refrakcija (P i S valovi)
- Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)
- Seizmička karotaža
- Seizmički efekti miniranja
- Mikrotremor
- Georadar



GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADovi

- Istražno bušenje u svim vrstama tla i stijena
- Statički penetracijski test (CPT, CPTU, SCPT)
- Standardni penetracijski test (SPT)
- Bušenje, ugradnja i pokusno crpljenje zdenaca i piezometara
- Izrada geotehničke dokumentacije (izvješća, elaborati, projekti)
- Geotehnički nadzor i savjetovanje



UPUTE AUTORIMA

Časopis inženjerstva okoliša objavljuje znanstvene i stručne radove te ostale priloge iz interdisciplinarnog područja inženjerstva okoliša. Znanstvena tematika časopisa uključuje geoinženjerstvo, upravljanje vodnim resursima, tehničke aspekte zaštite okoliša i srodna područja. Radovi se prihvaćaju za objavljivanje nakon pozitivne recenzije te se kategoriziraju kao izvorni znanstveni radovi, prethodna priopćenja, pregledni radovi ili stručni radovi.

Časopis objavljuje radove na hrvatskom ili engleskom jeziku. Naslov rada, sažetak i ključne riječi pišu se na hrvatskom i engleskom jeziku.

Časopis izlazi dva puta godišnje. Tiskanje rada se ne naplaćuje. Opseg rada u pravilu nije ograničen, ali preporuka je da sa svim priložima ne bude veći od 15 stranica A4 formata jednostrukog proreda.

Prilozi se tiskaju u greyscale formatu (sivo) i autori o tome trebaju voditi računa prilikom pripreme rukopisa. Ipak, autori mogu u dogovoru s uredništvom pripremiti i priloge u boji kada smatraju da je to neophodno za razumijevanje prikazanog. Prilozi u boji odobreni od strane uredništva dodatno se ne naplaćuju.

Dostava rada u postupak recenzije podrazumijeva da rad nije prethodno objavljen te da nije u postupku recenzije u drugom časopisu. Autor je odgovoran za sadržaj rada te za dobivanje mogućih suglasnosti vezanih za objavljivanje pojedinih podataka.

Prva stranica rada treba sadržavati naslov rada, imena autora, institucije zaposlenja i e-mail adrese autora, sažetak i ključne riječi. Preporuka je da naslov rada bude ilustrativan te da jasno odražava sadržaj rada. Ako naslov rada sadrži lokalne nazive tada treba navesti i opće prepoznatljivo ime šire regije. Sažetak rada treba sadržavati najviše 300 riječi, a ključne riječi 4 do 6 pojmova. Ako niti jedan od autora nije naveden kao vodeći, uredništvo će kontaktirati isključivo s prvim navedenim autorom.

Autori dostavljaju rad elektroničkom poštom na e-mail adresu: **casopis@gfv.hr**. Rad treba biti pripremljen u Microsoft Wordu, na A4 formatu stranice, s marginama od 25mm i proredom 1.5, u jednom stupcu s obostranim poravnanjem. Tekst se piše u Arial ili Calibri fontu veličine 10pt, a stranice imaju automatsku numeraciju u desnom donjem kutu. Ovisno o sadržaju tekst se dijeli u nekoliko poglavlja čiji naslovi su pisani podebljano veličine 12pt i poravnani ulijevo. Rad se piše u trećem

licu jednine i mora biti terminološki usklađen s važećim zakonskim propisima i međunarodnim sustavom jedinica (SI). Sve jednadžbe moraju biti numerirane, a tablice i slikovni prilozi numerirani sa naslovom i uključeni na odgovarajuće mjesto u članku. Svi slikovni prilozi (crteži, dijagrami, fotografije) trebaju biti pripremljeni za grafičku reprodukciju s minimalnom rezolucijom od 300 dpi i treba ih dostaviti u zasebnoj mapi.

Prilikom **citiranja radova u tekstu** navode se samo ranije objavljeni radovi. Ako autori smatraju potrebnim, tada se u radu mogu navesti i osobne komunikacije i neobjavljeni radovi, ali na prikladan način kao dio teksta ili u zahvalama na kraju rada. **Popis literature (References)** sadrži abecedni popis objavljenih radova citiranih u tekstu. Koristi se harvardski stil citiranja literature i popisa referenci.

U slučaju prihvaćanja rada za objavu autori imaju obavezu uskladiti rad s uputama recenzentata/uredništva. Ako autori ne prihvate primjedbe recenzentata/uredništva ili ako ne vrate ispravljenu verziju rada u roku od tri mjeseca, uredništvo će smatrati da su autori povukli rad iz procedure te da ga ne žele objaviti.

Autori će rad u obliku u kojem će biti objavljen prije same objave dobiti na uvid i završnu provjeru.

Rad koji je prošao sve faze pripreme teksta, najprije se objavljuje online, a nakon toga i u tiskanom izdanju. Autori dobivaju separat u .pdf obliku i jedan primjerak časopisa u kojem je rad objavljen.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The Environmental Engineering Journal publishes scientific and technical papers and other articles in the interdisciplinary area of environmental engineering. The scientific topics covered by the magazine include geo-engineering, water resources management, technical aspects of environmental protection and similar areas. Papers are accepted for publication after they have received a positive review and are categorized as an original scientific paper, previous announcement, review paper or technical paper.

The journal publishes papers in Croatian or English. The title of the paper, the abstract and keywords are written in both Croatian and English.

The journal is published biannually. There are no charges for printing the paper. As a rule, the length of the paper is not limited. However, it is recommended that it should not be longer than 15 single-spaced A-4 pages, all figures included.

Figures are printed in greyscale, and authors should take it into account when preparing their manuscript. However, authors may, in agreement with the editorial board, prepare figures in colour when they deem it necessary for the understanding of what the figure shows. The figures in colour approved by the editorial board will not be additionally charged.

When a paper is submitted for review, this implies that the paper has not been previously published or that it is not being reviewed by another journal. The author is responsible for the content of the paper and for obtaining consent, where applicable, to publish particular data.

The first page should contain the title of the paper, the authors' names, the institution of employment, the authors' email addresses, the abstract and keywords. It is recommended that the title of the paper should be illustrative and clearly reflect the content of the paper. If the title contains local names, then a generally recognizable name in a wider region should be included. The abstract should not exceed 300 words, and there should be 4 to 6 keywords. If none of the authors has been specified as lead author, the editors will exclusively contact the first mentioned author.

Authors should submit their paper by e-mail to: **casopis@gfv.hr**. The paper should be prepared in Microsoft Word in A4 page format, with 25mm margins and 1.5 line spacing, in one column aligned to both sides. The text should be written in 10pt Arial or Calibri, and the pages should have automatic numbering in the bottom right corner. Depending on the content, the text should be divided into

several sections whose headings are in 12 pt bold and aligned to the left. The paper should be written in the third person singular and has to be terminologically harmonized with legal regulations in force and the international system of units (SI). All equations have to be numbered; tables and figures should also be numbered with a heading and inserted in the appropriate place in the article. All figures (images, diagrams, photographs) have to be prepared for graphic reproduction at a minimum resolution of 300 dpi and submitted in a separate map.

When **citing papers in the text**, only previously published papers should be mentioned. If authors consider it necessary, personal communication and unpublished papers may be cited in the paper, but in an appropriate manner, either as part of the text or in acknowledgements at the end of the paper. **References** include an alphabetical list of published papers that have been cited in the text. The Harvard citation and referencing style should be used.

If the paper is accepted for publication, the authors are obliged to harmonize the paper with the instructions given by the reviewers/editors. If the authors do not accept the reviewers'/editors' remarks or if they do not submit the corrected version of the paper within three months, the editorial board will deem that the authors have withdrawn their paper from the procedure and no longer wish to have it published.

Prior to its publication, the authors will receive the paper for inspection and final revision.

The paper which has been through all the phases of text preparation will first be published online, and then in the printed edition. Authors will receive a separate in pdf format as well as one copy of the journal in which the paper was published.