

UDK
62:502/504

ISSN 1849-4714 (tisk)
ISSN 1849-5079 (online)



INŽENJERSTVO OKOLIŠA

Scientific and professional journal in the area
of environmental engineering

GEOTEHNIČKI
FAKULTET,
SVEUČILIŠTE U
ZAGREBU
VARAŽDIN,
HRVATSKA



FACULTY OF
GEOTECHNICAL
ENGINEERING,
UNIVERSITY OF
ZAGREB
VARAŽDIN,
CROATIA

GODIŠTE / VOLUME 3
BROJ / NUMBER 1
SRPANJ / JULY 2016

IMPRESSUM

Izdavač/Publisher:

GEOTEHNIČKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE 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, SVEUČILIŠTE 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, stjepan.strelec@gfv.hr

Urednički odbor/Editorial board:

Doc. dr. sc. Aleksandra Anić Vučinić, aav@gfv.hr
Prof. dr. sc. Andrea Bačani, andrea.bacani@rgn.hr
Prof. emeritus Božidar Biondić, bbiondic@gfv.hr
Izv. prof. dr. sc. Ranko Biondić, rbiondic@gfv.hr
Prof. dr. sc. Mladen Božičević, mladen.bozicevic@gfv.hr
Doc. dr. sc. Sanja Kalambura, sanja.kalambura@vvg.hr
Izv. prof. dr. sc. Sanja Kapelj, sanja.kapelj@zg.t-com.hr
Doc. dr.sc. Boris Kavur, boris.kavur@gvf.hr
Prof. emeritus Natalija Koprivanac, nkopri@fkit.hr
Prof. dr. sc. Davorin Kovačić, kovacic.geoekspert@gmail.com
Prof. dr. sc. Urška Lavrenčić Štangar, urska.lavrencic@ung.si (Slovenija)
Prof. dr. sc. Jakob Likar, jakob.likar@ogr.ntf.uni-lj.si (Slovenija)
Doc. dr. sc. Snježana Markušić, markusic@irb.hr
Izv. prof. dr. sc. Josip Mesec, jmesec@yahoo.com
Doc. dr.sc. Anita Ptiček Siročić, anitaps@gvf.hr
Doc. dr. sc. Milan Rezo, mrezo@gfv.hr
Doc. dr. sc. Zvezdana Stančić, zvezdana.stancic@gfv.hr
Doc. dr. sc. Radmila Šalić, r_salic@pluto.iziis.ukim.edu.mk (Macedonia)
Dr. sc. Josip Terzić, josip.terzic@hgi-cgs.hr
Prof. emeritus Ivan Vrkljan, ivan.vrkljan@igh.hr
Prof. dr. sc. Sabid Zekan, sabid.zekan@untz.ba (Bosnia and Herzegovina)
Doc. dr. sc. Željka Zgorelec, zzgorelec@agr.hr

Tehnički urednici/Technical board:

Doc. dr. sc. Hrvoje Meaški, hmeaski@gfv.hr
Doc. dr. sc. Bojan Đurin
Davor Stanko, mag. phys
Marija Đurinek, dipl.ing. građ.

Tisak/Printed by:

TISKARA ZELINA d.d., K.Krizmanić 1, HR-10380 Sveti Ivan Zelina, Hrvatska

Naklada/Edition:

300 primjeraka/300 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: Izvor Gradole (Mlinarić, Loborec, Biondić; stranica 23 / page 23)

Poštovano čitateljstvo,

Pred vama je novo izdanje časopisa Inženjerstvo okoliša. Radost uoči izlaska petog broja zasjenila je žalost i bol zbog smrti dragog kolege doc. dr. sc. Dinka Vujevića, koji je bio član Uredničkog odbora. Njegov pristup životu i razmišljanju ostavio je na nas neizbrisiv trag, bio je iznimno dobar čovjek, detaljan i temeljit znanstvenik te studentima omiljeni predavač. Svima koji su ga imali sreću poznavati ostat će u trajnoj uspomeni. Na zadnjim stranicama je objavljen In memoriam u njegovu čast.

Izdavanje časopisa zahtjeva izuzetan napor kako u tehničkoj pripremi tako i potrebitim rastućim financijskim sredstvima, no mi smo ponosni što smo u mogućnosti iste osigurati i činimo sve kako bi kontinuitet izlaženja uspješno nastavili. Ovo izdanje sadrži nekoliko radova u kojem su zahvaljujući programu poticajne nastave autori i koautori studenti. Time se potiče studente na znanstveno istraživački rad koji proširuje granice znanja putem sinergije nastavnika i studenata.

U ovom broju napravljen je kvalitetan odmak u odnosu na prethodne brojeve. Radovi su iz različitih grana u području tehničkih znanosti, s tim da se u svakome od njih može naći poveznica s interdisciplinarnim poljem i granom inženjerstva okoliša. Između sedam recenziranih radova publiciranih u ovom broju imamo tri izvorna znanstvena rada, tri pregledna rada i jedan stručni rad:

- IZRADA KARTE RIZIKA OD POJAVE KLIZIŠTA PRIMJENOM GIS TEHNOLOGIJE – PRIMJER OPĆINE BEDNJA, HRVATSKA
- ZAŠTITA PODZEMNIH VODA - PRIMJER PROCJENE RANJIVOSTI SLIVA IZVORA GRADOLE (HRVATSKA) UPOTREBOM SINTACS METODE;
- A REVIEW ON PERFORMANCE OF ENERGY PILES AND EFFECTS ON SURROUNDING GROUND;
- MOGUĆNOST UPORABE SAMONIKLIH VODENIH I MOČVARNIH BILJNIH VRSTA U BILJNIM UREĐAJIMA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA;
- SEISMIC MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF VIBRATION INTENSITY CAUSED BY BLASTING IN "GOVRLEVO" MINEFIELD, MACEDONIA;
- THE CONCEPT OF SUSTAINABLE IRRIGATION ON THE EXAMPLE OF FO-OTBALL FIELD OF F.C. "OBREŠ", SVETI ILIJA, CROATIA;
- OPORABA PET AMBALAŽE.

Kako bi održali visoku kvalitetu pozivamo Vas da nam se sa svojim radovima pridružite i unaprijed zahvaljujemo svim autorima koji će časopis INŽENJERSTVO OKOLIŠA prepoznati kao mjesto prezentiranja svojih rezultata istraživanja i novih spoznaja. Time nastojimo održati visoku kvalitetu i interdisciplinarnost časopisa. Na posljednjim stranicama možete naći upute autorima za slanje radova.

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

Varaždin 2016

7. savjetovanje
Hrvatskog
geotehničkog
društva s
međunarodnim
sudjelovanjem

geotehnički
aspekti
nestabilnosti
građevina
uzrokovanih
prirodnim
pojavama

7. savjetovanje

Hrvatskog geotehničkog društva s međunarodnim sudjelovanjem

održat će se **10-12. studenog 2016.** u Varaždinu. Zbog poplava u prošlim godinama kakve nam se više ne bi smjele događati, zbog klizišta koja su prečesta, zbog potresa na koje i zaboravljamo jer su, srećom, relativno rijetki, tema savjetovanja je

Geotehnički aspekti nestabilnosti građevina uzrokovanih prirodnim pojavama

PROGRAM SAVJETOVANJA

Četvrtak 10.11.2016.

Hotel Turist, Aleja kralja Zvonimira 1, Varaždin
19:00 – 21:00 Koktel dobrodošlice

Petak 11.11.2016

Prijevoz od Hotela Turist do Geotehničkog fakulteta i natrag organizira se posebnim autobusima
Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin

08:00 – 09:00 Prijava sudionika

09:00 – 1800 Pozvana predavanja,

prezentacije članaka i rasprava

Hotel Turist, Aleja kralja Zvonimira 1, Varaždin

20:00 – 24:00 Svečana večera

Subota 12.11.2016.

Stručna ekskurzija

09:00 Polazak iz hotela Turist

Stručna ekskurzija kroz varaždinski kraj s posjetom zanimljivim lokacijama u smislu arheologije, povijesti i kulture, ali posebno geotehnike, te zajednički ručak
17:00 Povratak u hotel

POZVANA PREDAVANJA

Predavanja će, između ostalih, održati profesor Heinz Brandl, TU Wien, o zaštiti od poplava, te profesori Norikazu Shimizu i Fusanori Miura iz Yamaguchi University o upravljanju opasnosti od klizišta. Professor Mladen Vučetić, UCLA, prikazat će djelovanje potresa na tlo.

PRIJAVA SUDJELOVANJA I PRIJAVA SAŽETAKA

Pozivamo članove geotehničke zajednice da se prijave koristeći obrazac na našim web stranicama

www.hgd-cgs.hr

IZLOŽBA I SPONZORI

Želite li izložiti svoje proizvode, prikazati projekte ili svoju organizaciju, molimo da se prijavite također preko obrasca na našim web stranicama ili da se javite na

varazdin.hgd.2016@gmail.com

VAŽNI DATUMI

Prijava sažetaka	1.06.2016.
Obavijest o prihvaćanju sažetaka	15.06.2016
Slanje članaka	1.09.2016.

KOTIZACIJA

Za članove HDG	do 01.07.2016.	650 kn
	od 02.07.2016.	750 kn
Za ostale sudionike	do 01.07.2016.	750 kn
	od 02.07.2016.	850 kn

Kotizacija uključuje: tiskani zbornik sa cjelovitim radovima, zbornik radova u elektroničkom obliku, koktel dobrodošlice, kavu i ručak u pauzama rada savjetovanja, svečanu večeru i stručnu ekskurziju sa zajedničkim ručkom. Plaćanje je opisano na web stranicama HGD.

SMJEŠTAJ

Smještaj je osiguran u Hotelu TURIST u Varaždinu

www.hotel-turist.hr.

Cijena noćenja s doručkom po osobi i danu boravka iznosi 190 kn u dvokrevetnoj sobi, doplata za jednokrevetnu sobu je 70 kn dnevno; boravišna pristojba je 7 kn po osobi dnevno.

SMJERNICE ZA IZLAGAČE I SPONZORE

Zainteresirani su pozvani da ispune prijavu na našim stranicama www.hgd-cgs.hr gdje se mogu vidjeti i svi ostali podaci o savjetovanju.

Na adresi varazdin.hgd.2016@gmail.com primamo dodatne upite, prijedloge te logo i reklamu organizacije koja se želi predstaviti. Uvjeti su navedeni u nastavku.

U ime Hrvatskog geotehničkog društva, o ovom savjetovanju brinu:
dr.sc. Igor Sokolić, predsjednik savjetovanja (igor.sokolic@geotehnicki-studio.hr)
dr.sc. Sonja Zlatović, potpredsjednik (szlatovic@tvz.hr)
dr.sc. Mario Gazdek, tajnik (mario.gazdek@gfv.hr),
prof.em. Ivan Vrkljan, predsjednik HGD (ivan.vrkljan@igh.hr).

Da bi reklame ili podaci o sponzorima bili objavljeni u zborniku radova, plaćanje je nužno izvršiti do **15.10.2016.** na račun Hrvatskog geotehničkog društva.

Pri tome, HGD nije u sustavu PDV-a. Plaćanje se mora izvršiti kao bankovna transakcija, a izvršitelj plaćanja mora podmiriti sva bankovna davanja (uključujući i naša). Uplate iz tuzemstva:
Hrvatsko geotehničko društvo, Berislavićeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska
Banka: Zagrebačka banka, Trg Bana Josipa Jelačića 10, Zagreb, Hrvatska
IBAN: HR4823600001101437707
Uplate iz inozemstva:
Hrvatsko geotehničko društvo, Berislavićeva 6, 10000 Zagreb, Croatia
Banka: Zagrebačka banka, Trg Bana Josipa Jelačića 10, Zagreb, Croatia
IBAN: HR4823600001101437707
SWIFT code: ZABHR2X

KONTAKT

varazdin.hgd.2016@gmail.com
www.hgd-cgs.hr

ORGANIZACIJSKI ODBOR

Igor Sokolić – predsjednik savjetovanja
Sonja Zlatović – potpredsjednik savjetovanja
Mario Gazdek – tajnik savjetovanja
Ivan Vrkljan – predsjednik HGD
Predrag Kvasnička – tajnik HGD
Davor Milaković – blagajnik HGD
Leo Matešić
Ivan Mihaljević

ZNANSTVENI ODBOR

Dietmar Adam, Austrija
Atilla Ansal, Turska
Željko Arbanas, Hrvatska
Mario Gazdek, Hrvatska
Tomislav Ivšić, Hrvatska
Vojkan Jovičić, Slovenija
Anatolij Kavrov, Ukrajina
Boris Kavur, Hrvatska
Evgeniy Klimenko, Ukrajina
Biljana Kovačević Zelić, Hrvatska
Predrag Kvasnička, Hrvatska
Janko Logar, Slovenija
Snježana Mihalić, Hrvatska
Predrag Miščević, Hrvatska
Fusanori Miura, Japan
Mensur Mulabdić, Hrvatska
Jovan Papić, Makedonija
Norikazu Shimizu, Japan
Igor Sokolić, Hrvatska
Motoyuki Suzuki, Japan
Antun Szavits-Nossan, Hrvatska
Nataša Štambuk-Cvitanović, Hrvatska
Ingrid Tomac, Hrvatska, SAD
Ákos Török, Mađarska
Ivan Vrkljan, Hrvatska
Mladen Vučetić, SAD
Sonja Zlatović, Hrvatska
Dobroslav Znidarčić, SAD
Bojan Žlender, Slovenija

UVJETI ZA IZLAGAČE I SPONZORE

Generalni sponzor ima sve pogodnosti Zlatnog sponzora, a dodatne pogodnosti i uvjete dogovara direktno s predsjednikom HGD ili predsjednikom savjetovanja. U svim službenim materijalima skupa sponzor se navodi kao Generalni sponzor (samo jedan sponzor može biti generalni sponzor): **prema dogovoru**

Zlatni sponzor ostvaruje pravo na objavljivanje reklame u zborniku radova (cijela stranica). Logo sponzora ističe se na plakatu i službenim PP prezentacijama savjetovanja, u kategoriji Zlatni sponzor. Na internet stranicama HGD-a objavljuje se logo sa linkom na internet stranicu sponzora u trajanju od godine dana: **10.000 kn**

Srebrni sponzor ostvaruje pravo na objavljivanje reklame u zborniku radova (pola stranice). Logo sponzora ističe se na plakatu i službenim PP prezentacijama savjetovanja, u kategoriji Srebrni sponzor. Na internet stranicama HGD-a objavljuje se logo sa linkom na internet stranicu sponzora u trajanju od godine dana: **7.000 kn**

Brončani sponzor navodi se na popisu sponzora u zborniku radova te na službenim PP prezentacijama savjetovanja u kategoriji Brončani sponzor. Na internet stranicama HGD-a objavljuje se naziv sponzora sa linkom na internet stranicu sponzora u trajanju od godine dana: **3000 kn**

Izlagatelj mora biti kategorije Zlatni ili Srebrni sponzor. Navedeni iznos se uplaćuje dodatno, a Sponzor ostvaruje pravo na korištenje izložbenog prostora u prostorijama Geotehničkog fakulteta u Varaždinu. Izložbeni prostor predviđa stol i stolicu: **2.000 kn**

Ostali sponzori navode se pri otvaranju i zatvaranju savjetovanja. Na internet stranicama HGD-a objavljuje se naziv sponzora sa linkom na internet stranicu sponzora u trajanju od 3 mjeseca: **prema dogovoru**

Varaždin 2016

7. savjetovanje
Hrvatskog
geotehničkog
društva s
međunarodnim
sudjelovanjem

geotehnički
aspekti
nestabilnosti
građevina
uzrokovanih
prirodnim
pojavama

7. savjetovanje

Hrvatskog geotehničkog društva s međunarodnim sudjelovanjem

održat će se **10-12. studenog 2016.** u Varaždinu. Zbog poplava u prošlim godinama kakve nam se više ne bi smjele događati, zbog klizišta koja su prečesta, zbog potresa na koje i zaboravljamo jer su, srećom, relativno rijetki, tema savjetovanja su

Geotehnički aspekti nestabilnosti građevina uzrokovanih prirodnim pojavama

U savjetovanju će sudjelovati eksperti sa Technische Universität Wien (TUWIEN), Austria, University of California Los Angeles (UCLA), SAD, Yamaguchi University (山口大学), Japan, te uključujemo sudionike iz okolnih i dalekih zemalja da bi savjetovanje bilo poticaj svim članovima Hrvatskog geotehničkog društva i zajednici u kojoj živimo i za koju radimo. Pozvana predavanja, prezentacije radova naših članova i gostiju kao i izložba odvijat će se u petak, **11.11.2016.** u prostorima Geotehničkog fakulteta u Varaždinu koji su shematski prikazani na poledini. Važna uloga naših savjetovanja je susret članova, razgovori stručni i prijateljski, a ovog puta imat ćemo i mnoge goste iz drugih zemalja. U programu će biti osigurano dovoljno vremena za pauze i rasprave. Prostor u kome će biti ponuđena kava i sokovi tijekom pauza, te prostor kojim se prolazi do dvorane, ponuđeni su za izlaganje opreme potrebne u geotehnici, prikaz zanimljivih projekata ili mogućnosti

S A D R Ź A J – C O N T E N T

<p>Nikola Počekal, Jelena Loborec, Hrvoje Meaški IZRADA KARTE RIZIKA OD POJAVE KLIZIŠTA PRIMJENOM GIS TEHNOLOGIJE – PRIMJER OPĆINE BEDNJA, HRVATSKA THE LANDSLIDE RISK MAP PREPARATION USING GIS TECHNOLOGY – AN EXAMPLE OF THE BEDNJA MUNICIPALITY, CROATIA</p>	7
<p>Maja Mlinarić, Jelena Loborec, Ranko Biondić ZAŠTITA PODZEMNIH VODA - PRIMJER PROCJENE RANJIVOSTI SLIVA IZVORA GRADOLE (HRVATSKA)UPOTREBOM SINTACS METODE GROUNDWATER PROTECTION - AN EXAMPLE OF VULNERABILITY ASSESSMENT OF THE GRADOLE SPRING CATCHMENT AREA (CROATIA) USING SINTACS METHOD)</p>	21
<p>Renato Zagorščak, Hywel Rhys Thomas A REVIEW ON PERFORMANCE OF ENERGY PILES AND EFFECTS ON SURROUNDING GROUND PREGLED NAČINA RADA ENERGETSKIH PILOTA I UTJECAJA NA OKOLNO TLO</p>	33
<p>Zvezdana Stančić, Lucija Baić, Valentina Kraš MOGUĆNOST UPORABE SAMONIKLIH VODENIH I MOČVARNIH BILJNIH VRSTA U BILJNIM UREĐAJIMA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA POTENTIAL FOR USING WILD AQUATIC AND MARSHLAND PLANT SPECIES IN CONSTRUCTED WETLANDS FOR WASTEWATER TREATMENT</p>	47
<p>Zoran Milutinović, Radmila Šalić, Daniel Tomić, Goce Bogdanovski SEISMIC MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF VIBRATION INTENSITY CAUSED BY BLASTING IN "GOVRLEVO" MINEFIELD, MACEDONIA SEIZMIČKA MJERENJA I ANALIZA INTENZITETA VIBRACIJA IZAZVANIH MINIRANJEM U RUDNIKU „GOVRLEVO“, MAKEDONIJA</p>	63
<p>Boyan Borisov, Bojan Đurin, Josip Matin THE CONCEPT OF SUSTAINABLE IRRIGATION ON THE EXAMPLE OF FOOTBALL FIELD OF F.C. "OBREŠ", SVETI ILIJA, CROATIA KONCEPT ODRŽIVOG NAVODNJAVANJA NA PRIMJERU NOGOMETNOG TERENA N.K. "OBREŠ", SVETI ILIJA, CROATIA</p>	71
<p>Anita Ptiček Siročić, Marijan Đurina, Evica Špoljarić OPORABA PET AMBALAŽE PET PACKAGING RECOVERY</p>	83
<p>IN MEMORIAM Doc.dr.sc. Dinko Vujević</p>	93

Varaždin 2016

7th conference of Croatian Geotechnical Society with international participation

geotechnical aspects of damages caused by natural phenomena

7th Conference of Croatian Geotechnical Society with international participation

will be held

10-12 November 2016 in Varaždin

with the title

Geotechnical Aspects of Damages Caused by Natural Phenomena

PROGRAMME

Thursday 10 November 2016

Hotel Turist, Aleja kralja Zvonimira 1, Varaždin

19:00 – 21:00 Welcome cocktail

Friday 11 November 2016

Transportation from the Hotel Turist to the Geotechnical Faculty and back is organized by special buses

Geotechnical Faculty Varaždin, Hallerova aleja 7

08:00 – 09:00 Registration

09:00 – 18:00 Invited lectures, presentations and discussions

Hotel Turist, Aleja kralja Zvonimira 1, Varaždin

20:00 – 24:00 Banquet

Saturday 12 November 2016

Excursion

09:00 Start from the hotel

Excursion will cover geotechnically, archeologically, historically and culturally most interesting spots of the surroundings of Varaždin, and will conclude with a dinner.

17:00 Return to the hotel

INVITED LECTURES

Professor Heinz Brandl, Technical University Wien, Austria, will give a lecture on floods - Stability, defense and failures of dykes. Presenters from Yamaguchi University, Japan, professors Norikazu Shimizu and Fusanori Miura, will give lectures on mitigation of natural disasters and application of remote sensing technologies. Professor Mladen Vucetic, UCLA, USA, will present behaviour of soil in earthquakes.

REGISTRATION AND ABSTRACT SUBMISSION

We invite interested colleagues to register for the conference and submit abstracts on our web site: www.hgd-cgs.hr

EXHIBITION AND SPONSORS

A series of companies will take part in the exhibition. If you wish to exhibit your products or projects, we invite you to register and show your interest on same

<http://www.hgd-cgs.hr/>

or write to

varazdin.hgd.2016@gmail.com

IMPORTANT DATES

Abstract submission	1 June 2016
Acceptance of abstracts	15 June 2016
Acceptance of papers	1 September 2016

REGISTRATION FEE

until 1 July 2016	85 EUR
from 2 July 2016	100 EUR

Registration fee covers printed proceedings with e-version, welcome cocktail, refreshments during breaks of the conference and lunch, banquet, excursion with dinner. Details of payment are given on our web pages.

ACCOMODATION

Special reservations have been made for the conference participants in the Hotel TURIST in Varaždin (www.hotel-turist.hr).

Bed and breakfast are 190 kn daily per bed in double rooms, 260 kn daily in a single bedroom, with tax of 7 kn daily per person.

Guidelines for sponsors and exhibitors

Interested parties are invited to fill out the application on our web page

www.hgd-cgs.hr

where all other conference informations are given.

For additional inquiries or suggestions, as well as for sending logos and advertisements of the organizations that want to present themselves at the conference, please, use address

varazdin.hgd.2016@gmail.com,

For the sponsors wishing to have an advertisement published in the conference proceedings,

it is important that payments are made before **15.10.2016**.

All payments must cover all bank charges incurred for this transaction including „our“ bank charges.

The only way we can accept payments is bank transfer.

Croatian Geotechnical Society is not in VAT system, so no VAT is to be paid.

All payments are to be made to the account of the Croatian Geotechnical Society

Bank account holder:

Hrvatsko geotehnicko drustvo
(address: Berislaviceva 6, 10000 Zagreb, Croatia)

Bank name:

Zagrebacka banka

Bank address:

Trg Bana Josipa Jelacica 10 Zagreb, Croatia

IBAN: HR4823600001101437707

SWIFT code: ZABAHR2X

Key persons in charge of the Exhibition:

PhD Igor Sokolić, conference president

(igor.sokolic@geotechnicki-studio.hr)

Prof.em. PhD Ivan Vrkljan, president of CGS

(ivan.vrkljan@igh.hr)

PhD Mario Gazdek, conference secretary

(mario.gazdek@gfv.hr)

CONTACT

varazdin.hgd.2016@gmail.com

www.hgd-cgs.hr

ORGANIZATION COMMITTEE

Igor Sokolić, conference president

Sonja Zlatović, conference co-president

Mario Gazdek, conference secretary

Ivan Vrkljan, president of Croatian

Geotechnical Society

Predrag Kvasnička

Davor Milaković

Leo Matešić

Ivan Mihaljević

SCIENTIFIC COMMITTEE

Dietmar Adam, Austria

Atilla Ansal, Turkey

Željko Arbanas, Croatia

Mario Gazdek, Croatia

Tomislav Ivšić, Slovenia

Vojkan Jovičić, Ukraine

Anatolij Kavrov, Ukraine

Boris Kavur, Croatia

Evgeniy Klimentko, Ukraine

Biljana Kovačević Zelić, Croatia

Predrag Kvasnička, Croatia

Janko Logar, Slovenia

Snježana Mihaljić, Croatia

Predrag Mišćević, Croatia

Fusanori Miura, Japan

Mensur Mulabdić, Croatia

Jovan Papić, Macedonia

Norikazu Shimizu, Japan

Igor Sokolić, Croatia

Motoyuki Suzuki, Japan

Antun Szavits-Nossan, Croatia

Nataša Štambuk-Cvitanović, Croatia

Ingrid Tomac, Croatia & USA

Ákos Török, Hungary

Ivan Vrkljan, Croatia

Mladen Vučetić, USA

Sonja Zlatović, Croatia

Dobroslav Znidarič, USA

Bojan Žlender, Slovenia

Varaždin 2016

7th conference of Croatian Geotechnical Society with international participation

geotechnical aspects of damages caused by natural phenomena

7th Conference of Croatian Geotechnical Society with international participation

will be held

10-12 November 2016. in Varaždin

with the title

Geotechnical Aspects of Damages Caused by Natural Phenomena

International experts are coming to give lectures from Technische Universität Wien (TUWIEN), Austria, University of California Los Angeles (UCLA), USA, Yamaguchi University (山口大学), Japan, and we are expecting participants from near and far countries as well as many members of our society.

Lectures and presentations will be given on

Friday, **11.11.2016**, at the Geotechnical

Faculty, University of Zagreb, in Varaždin,

Hallerova aleja 7, where also lunch will be served.

Important role of our conferences is giving opportunity to our members – and other colleagues this time – to meet and discuss, so we will make sure also that coffee breaks are long enough and in the area of exhibition.

At the back of this leaflet a scheme of the entrance halls, large lecture hall, area for coffee breaks and exhibition is shown.

General sponsor has all amenities of a Golden sponsor, and the additional benefits and conditions are negotiated directly with the CGS president or the conference president. In all official materials the sponsor is credited as the General sponsor (only one sponsor can be the general sponsor): **as agreed**

Golden sponsor is entitled to advertisement publishing in the conference proceedings (complete page). Sponsor logo is emphasized on the poster and the official PP conference presentations, in the category Golden sponsor. The logo with a link to the sponsor's web pages will be published on the CGS web pages in the period of one year: **1300 EUR**

Silver sponsor is entitled to advertisement publishing in the conference proceedings (half page). Sponsor logo is emphasized on the poster and the official PP conference presentations, in the category Silver sponsor. The logo with a link to the sponsor's web pages will be published on the CGS web pages in the period of one year: **930 EUR**

Bronze sponsor is stated on the list of sponsors in the conference proceedings and in the official PP conference presentations in the category Bronze sponsor. Sponsor's name with a link to the sponsor's web pages will be published on the CGS web pages in the period of one year: **400 EUR**

Exhibitor must be in the category Golden or Silver sponsor. The mentioned amount is to be paid additionally, and the Sponsor is entitled to use the exhibition space in the Varaždin Geotechnical Faculty spaces. Exhibition space includes a table and a chair: **270 EUR**

Other sponsors are mentioned in the conference official PP conference presentations. The name of the sponsor with a link to the sponsor's web page is published on the CGS web pages in the period of 3 months: **as agreed**

IZRADA KARTE RIZIKA OD POJAVE KLIZIŠTA PRIMJENOM GIS TEHNOLOGIJE – PRIMJER OPĆINE BEDNJA, HRVATSKA

THE LANDSLIDE RISK MAP PREPARATION USING GIS TECHNOLOGY – AN EXAMPLE OF THE BEDNJA MUNICIPALITY, CROATIA

Nikola Počekal, Jelena Loborec^{1*}, Hrvoje Meaški¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za hidrotehniku, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: jloborec@gfv.hr

Sažetak: Na području općine Bednja nalazi se veliki broj klizišta, potencijalnih klizišta, odnosno nestabilnih padina, koja su kroz duže vremensko razdoblje istraživana i dijelom sanirana. Osnovni cilj rada je pomoću GIS tehnologije, preklapanjem različitih prostornih podataka, pokušati predvidjeti potencijalno najugroženije zone u kojima se klizišta mogu pojaviti. Kod razvoja GIS modela određivanja zona rizika od pojave klizišta korištene su slijedeće podloge: nagib terena, geološka građa terena, dreniranost tla i srednja godišnja količina padalina, kao prirodni čimbenici koji utječu na pojavu klizišta, te korištenja zemljišta (landuse) i utjecaj prometnica, koji predstavljaju pretežno antropogene čimbenike koji utječu na pojavu klizišta na nekom području. Prikazana su dva varijantna rješenja za procjenu rizika. U slučaju prve varijante, u kojoj su prometnice u modelu uzete kao destabilizirajući čimbenik, zone visokog i vrlo visokog rizika od pojave klizišta zauzimaju trećinu ukupne površine općine Bednja. Ovo varijantno rješenje je trenutno i najbliže stvarnom stanju u kojemu se danas nalazi općina Bednja. U drugom varijantnom rješenju, u kojem su prometnice u modelu uzete kao stabilizirajući čimbenik, pretpostavka je da su sve prometnice sanirane i da samim time osiguravaju stabilnost padine. Ponovljenom analizom udjela rizičnih površina uočeno je da udio srednje rizičnih površina na području općine Bednja ostaje praktički isti, ali dolazi do preraspodjele vrlo visoko i visoko rizičnih zona u korist nisko ili vrlo nisko rizičnih zona. To je zbog toga što ceste, zajedno sa svom infrastrukturom i izgradnjom stambenih i drugih objekata u zoni ceste, u konačnici predstavljaju glavnu opasnost za stabilnost padina. Time prometnice postaju dobar indikator na kojim područjima postoji opasnost da će doći do klizišta.

Ključne riječi: Bednja, klizišta, GIS.

Abstract: In the municipality of Bednja are a large number of landslides, potential landslides or unstable slopes, which are for the long time period studied and partially repaired. The main objective of this paper is by using of GIS technology, with spatial overlapping of different data, to try to anticipate potentially vulnerable areas where landslides may occur. For the development of the GIS model for determining the risk zones of landslides were used the following layers: slope map, geological map, soil drainage map and mean annual precipitation map, as well as natural factors affecting the occurrence of landslides and landuse map and the impact of roads, which are predominantly anthropogenic factors influencing the occurrence of landslides in the area. Two alternatives for the risk map of landslides were presented. In the case of the first variant, in which the roads in the model were taken as a destabilizing factor, zones of high and very high risk of landslides cover a third of the total area of the municipality of Bednja. This variant solution is currently the closest to the actual situation in which the municipality is now. In another variant, in which the roads in the model were taken as a stabilizing factor, the assumption is that all the roads were repaired and thus ensure the stability of slopes. With the repeated analysis of risk areas, it could be observed that the covering of the medium-risk areas in the municipality of Bednja remains practically at the same level, but there is a redistribution of very high and high risk zones in favor of low or very low-risk zones. This is because the roads, with all associated infrastructure and construction of residential and other buildings in the zone of roads, represent the main threat to the stability of slopes. Thus, roads are a good indicator of which areas there is quite a big chance that there will be a landslide.

Keywords: Bednja, landslides, GIS

Received: 08.01.2016 / Accepted: 03.06.2016

Published online: 04.07.2016

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

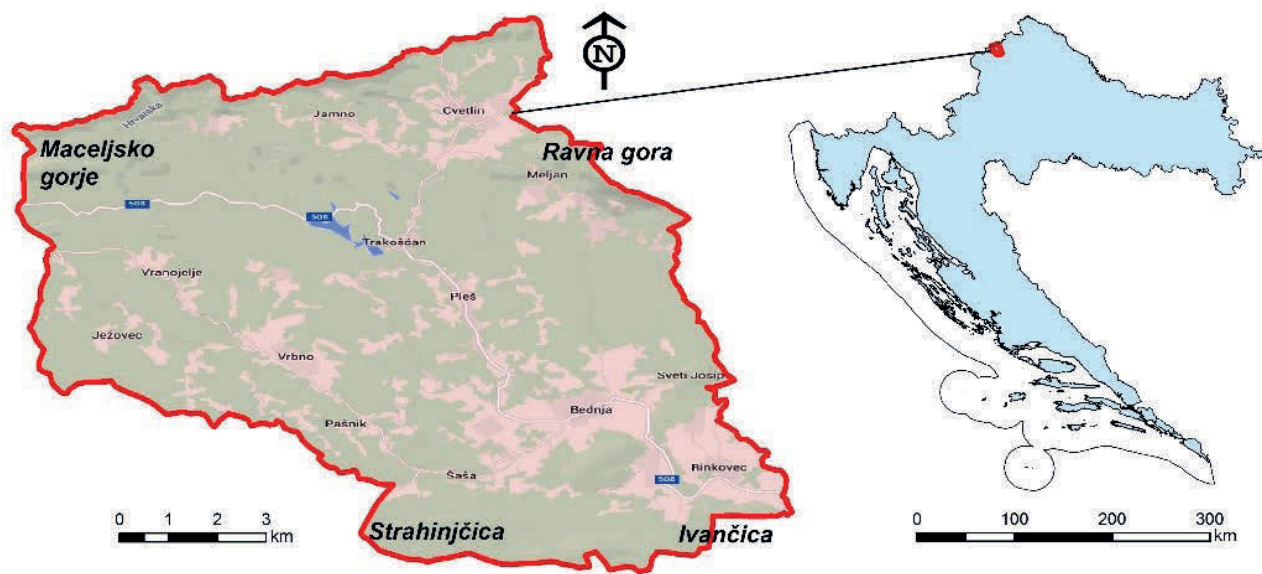
Masovna pojava klizanja na nekom prostoru uglavnom se dovodi u vezu sa specifičnim geomorfološkim obilježjima područja (nagibom padine, vegetacijom), geološkom građom terena (vrstom stijene i njenim trošenjem), geotehničkom osjetljivošću terena, promjenom sadržaja vode u terenu (naglo dizanje razine podzemne vode, povećanje brzine toka), hidrometeorološkim obilježjem, ali i vrlo često u naseljenim područjima s antropogenim utjecajem (promjene opterećenja na padini uslijed nepravilnih graditeljskih zahvata, gradnja nasipa, zasjeka, ustrmljav-

anja kose padine, deforestacija područja,...). Sve ove pojave, bilo prirodne, bilo antropogene, dovode do smanjenja posmične čvrstoće materijala u padini i u konačnici uzrokuju pomicanje tla ili stijene.

Klizišta pritom uzrokuju velike materijalne štete, a izravno ili neizravno ugrožavaju i lokalno stanovništvo. Poticaj za istraživanje klizišta upravo na području općine Bednja bila je elementarna nepogoda iz 2006. godine, prilikom koje su na relativno malom području i u kratkom vremenu evidentirana mnogobrojna klizišta na ovome području.

Cilj rada bio je da se uz pomoć sistematiziranih i statistički obrađenih dostupnih podataka o postojećim klizištima na području općine Bednja i obilaskom terena pokuša inženjerskim načinom razmišljanja napraviti pregledna karta rizika od pojave klizišta u mjerilu 1:50.000. Zamisao je bila da se rezultati istraživanja klizišta prikažu uz pomoć GIS tehnologije, i na taj način približe i široj javnosti. Na karti bi se pritom različitim bojama prikazale zone različitog stupnja opasnosti od pojave klizišta, a koje bi zatim mogle poslužiti kao dobra osnova za buduća detaljnija istraživanja potencijalno opasnih zona ili za planiranje razvoja ovog izrazito turistički usmjerenog područja Varaždinske županije.

Istraživano područje je općina Bednja ili bednjanski kraj, područje koje je dio Varaždinske županije. Nalazi se na krajnjem sjeverozapadu Hrvatskoga zagorja, a svojim sjeverozapadnim dijelom dotiče državnu granicu prema Republici Sloveniji (Slika 1). Područje općine Bednja je sa svih strana okruženo i zatvoreno gorama: Ivančicom (1061 m n.m.) na jugoistoku, Strahinjčicom (847 m n.m.) na jugu, te Maceljskim gorjem (715 m n.m.) na sjeverozapadu i Ravnom gorom (686 m n.m.) na sjeveroistoku.



Slika 1. Smještaj općine Bednja u Republici Hrvatskoj

Površina općine iznosi 75,58 km². To je izrazito brežuljkasti kraj u kojemu nadmorska visina varira od oko 230 m n.m. (područje Rinkovca uz rijeku Bednju), pa sve do 686 m n.m. (vrh Ravne gore). Ravna gora je najsjevernija gora Hrvatskoga zagorja. Smjestila se u gornjem porječju rijeke Bednje i smatra se posljednjim ogrankom Alpi. Prekrivena je pretežno bjelogoričnom šumom s primjesama crnogorice, a karakteristična je i po krškim pojavama, po čemu je jedinstvena u sjevernom dijelu Hrvatske. Kroz općinu teče rijeka Bednja koja izvire u mjestu Bednjica, u podnožju Ravne gore. Dužina toka joj je oko 133 km, a teče između Ravne gore i Ivančice, te u nastavku sve do rijeke Drave. Od ostalih većih vodnih pojava na području općine Bednja ističe se Trakošćansko jezero (246 m n.m.), koje je dio kompleksa Parka prirode Trakošćan. Radi se o akumulacijskom jezeru, koje je nastalo u razdoblju od 1853.-1862. godine uređenjem prostora oko dvorca Trakošćan. Površina jezera je oko 17 ha, dugačko je oko 1,5 km, i najveće dubine oko 4 metra.

Klimatska obilježja područja općine Bednja zbog nedostatka podataka do sada nisu pobliže istražena. Općenito se može reći da područje Bednje, kao i cijela sjeverozapadna Hrvatska, spada u umjereno topli i kišni tip klime. Ovaj tip klime često se naziva i "klimom bukve", prema prevladavajućem šumskom raslinju. Srednja

godišnja količina padalina u bednjanskome kraju kreće se između 1100 mm i 1300 mm (Zaninović et al. 2008). Posebno su izražene niske minimalne temperature tijekom zimskog perioda, osobito nakon prolaska hladnih fronti. Jutarnja temperatura od -20°C zimi je redovita pojava. Zbog ovih i sličnih pojava, bednjanska kotlina se ponekad naziva i „Zagorska Lika“ (Slika 2).



Slika 2. Pogled na dio bednjanskog kraja

Po posljednjem popisu stanovništva iz 2011. godine, općina Bednja imala je 3 992 stanovnika, raspoređenih u čak 25 naselja, jer se na gotovo svakom brežuljku nalazi neki zaselak (DZS 2011). Većina naselja u općini Bednja smještena je na brežuljcima visokima do 350 m n.m.. Bednjanski kraj je poljoprivredno seosko područje niske gospodarske razvijenosti, ali očuvanih prirodnih resursa, ljepote krajolika te kulturne baštine. Parcele su dosta usitnjene, pa se ne mogu kvalitetno poljoprivredno iskorištavati. Od poljoprivrednih površina postoje oranice, voćnjaci, vinogradi, livade i pašnjaci.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

2.1. Geologija istraživanog područja

Geološka građa područja općine Bednja do sada je najdetajnije istražena i prikazana Osnovnom geološkom kartom M 1:100 000, listovima Rogatec (Aničić & Juriša 1984) i Varaždin (Šimunić et al. 1982).

Najstarije naslage na području općine Bednja pripadaju naslagama srednjotrijaske starosti (T_2), a radi se o pojavama glinastih škriljevaca, pješčenjaka, dolomita, rožnjaka i tufova. Naslage trijasa su vezane za dublje dijelove sedimentacijskog prostora, odnosno za rubne planine bednjanskog kraja (Ravnu goru, Ivančicu...). Sitnozrnate klastične stijene su pretežno fino-zrnate-pelitske. Tamne boje koje dolaze uglavnom od koncentracije pirita i organske osnove. U manjoj količini su zastupljeni feldspati, piriti, tinjci i gline.

Geološki gledano općina Bednja se najvećim dijelom nalazi na naslagama miocenske starosti (M_1^2), u kojima dominiraju žutosmeđi kvarcni pijesci s proslojcima i lećama pijeska, konglomerata, te pješčanog lapora i laporaste gline. Pijesak je sastavljen uglavnom od kamenih zrnaca i tinjaca. Kada je slojevitost vidljiva tada su slojevi uglavnom debljine od 10 cm do 1 m. U obliku tankih leća unutar njih se nalaze slojevi pješčanog i glinenog lapora, obično sive do tamno sive boje (Slika 3).



Slika 3. Pojave pijesaka s proslojcima lapora sive boje

Manji dio područja je zastupljen s mlađim naslagama miocena (M_2^2), koje su karakteristične uglavnom po laporima, laporovitim vapnencima i pjeskovitim laporima. Lapor je često sive ili zelenkasto sive boje.

Drugi najzastupljeniji geološki član na području općine Bednja predstavljaju najmlađe naslage holocena. Radi se o aluviju (al), koji se sastoji od finog šljunka, pijeska, mulja i gline. Glavna komponenta aluvijalnih naslaga je slabo sortirani pješčano-glineni mulj. Pijesak je uglavnom kvarcni i ima ga preko 50%.

2.2. Pojave klizišta na području Bednje

U bednjanskom kraju su evidentirana brojna klizišta. Područje općine je poznato i po učestalosti pojave klizišta, kao i činjenici da je upravo zbog klizanja terena u ovome kraju već više puta proglašena elementarna nepogoda – do početka 2011. godine čak sedam puta (Slika 4). Uglavnom bivaju uništene prometnice, ali nova klizanja terena sve više postaju i prijetnja urušavanju stambenih objekata i gospodarskih zgrada. Za sanaciju postojećih klizišta se izdvajaju milijunska sredstva, jer se nastoje što prije sanirati, ali nova ponovno nastaju u pravilu svake godine. Bednjanski kraj pripada području povećane padinske osjetljivosti, jer su prirodni pokosi na granici ravnoteže, te je potrebna vrlo mala promjena kako bi se narušila prirodna ravnoteža (Soldo et al. 2006).



Slika 4. Primjer klizišta iz 2009. (www.duzs.hr)

Za potrebe sanacija klizišta općine Bednje (Soldo et al. 2006) izvedeni su geotehnički istražni radovi koji su uključivali geodetske izmjere pužišta i/ili klizišta, te istražne bušotine za određivanje karakteristika pojedinih slojeva tla (dubinu i debljinu svakog pojedinog sloja), moguću pojavu i razinu podzemne vode, procjenu dubine klizne plohe, dubinu do koje je bušotina izvedena i inklinacija. Uzorci iz bušotina podvrgnuti su laboratorijskim ispitivanjima koja su obuhvaćala određivanje fizikalnih svojstava tla, granulometrijski sastav, aktivnost gline, parametre čvrstoće, nedreniranu čvrstoću, indeksne pokazatelje i dr.

Temeljem istražnih radova došlo se spoznaja da je najčešća pojava klizišta na području Bednje na padinama koje imaju prirodni nagib 10° - 15° (Soldo et al. 2006). Objašnjenje autora je bilo da se pod tim nagibom voda procjeđuje duže vrijeme, te na kontaktu s laporovitim ili čvrstom podlogom dolazi do klizišta. Dobrim dreniranjem padine može se smanjiti razina i količina vode koja ulazi u tlo, te time povećati smična čvrstoća tla i spriječiti pojavu klizišta.

Antropogeni utjecaj se u bednjanskom kraju pojavljuje najčešće prilikom gradnje, rekonstrukcije i/ili održavanju prometnica na prirodno nestabilnim padinama. Loša ili neadekvatna izvedba pritom predstavlja još jednu slabost koja narušava prirodnu ravnotežu. Istraživanja su također pokazala da je dosta čest slučaj pojave cestovnih klizišta u podbriježnoj strani ceste gdje uslijed dodatnog nasipavanja same podloge ceste i neadekvatno održavane odvodnje dolazi do dodatnog opterećenja padine.

No, klizišta se mogu javiti i u pribriježnim padinama uz cestu. Ublažavanjem zaszeka u padini povećava se samo lokalna stabilnost pokosa zaszeka, ali generalno destabilizira se padina jer se uklanjanjem materijala u usijeku olakšava nožica generalne padine. Na prvi pogled ublažavanje nagiba pokosa usjeka ili skidanje djela materijala koji je u puzanju trebalo bi biti stabilnije, no često se pojavi nenamjerni rizik (Soldo & Orešković 2009)

Dodatna istraživanja pojave klizišta u bednjanskome kraju (Soldo et al. 2010) pokazala su povezanost nastanka klizišta i meteoroloških prilika, odnosno količine padalina u vrijeme pojave nestabilnost padina. Uočeno je da do velikih klizanja dolazi u slučajevima kada je količina padalina i njihov kontinuitet značajno povećan tokom zime i proljeća iste godine, te u slučajevima kontinuiranih, laganih padalina (sitne kiše) koja polako natapaju tlo i dovode do njegove maksimalne saturacije, kao i prilikom polaganog otapanja snijega nakon zime.

2.3. Kratki prikaz odabranih lokacija

U nastavku su u kratko opisana tri klizišta s područja općine Bednja, koja su u konačnici poslužila za verifikaciju postavljenog modela u ovome radu.

Lokacija Jamno – Cari. Na predjelu ove lokacije nastalo je klizište širine cca 30 m i neodređene duljine. Klizištem je zahvaćena bankina lokalne prometnice. Iznad samog čela klizišta nalaze se obiteljske kuće na kojima još nisu vidljive nikakve promjene. Na spomenutoj lokaciji napravljeni su terenski istražni radovi (izrada geotehničkih istražnih bušotina, vađenje poremećenih i neporemećenih uzoraka tla, opažanje pojave podzemne vode, SPT) i geodetsko snimanje terena. Zaključak istraživanja bio je kako je do klizanja terena došlo uslijed neadekvatne odvodnje površinskih i podzemnih voda. Uslijed ukupnog djelovanja vode došlo je do promjene opterećenja kosine i do postupnog smanjenja posmične čvrstoće tla, a posljedično i do pokliznuća padine. Na ovom klizištu je napravljeno 4 istražnih bušotina raspoređenih od čela klizišta prema nožici klizišta. Iz istražne bušotine pri čelu klizišta dobiveni su podaci da je do 30 cm dubine pokrivni sloj humusa, zatim do dubine 3,4 m glina niske plastičnosti, žuto smeđe boje, srednje gnječive konzistencije a na dubini od 3,4 do 4,6 m laporovita glina žuto smeđe boje, a od 4,6 m lapor i na toj dubini je približno određena dubina klizne plohe kod čela klizišta dakle na kontaktu sa čvrstom podlogom. Iz bušotina po tijelu klizišta dobiveni su bliski rezultati dubina sa istim opisima tla. Kod nožice kontakt laporovite gline žuto-smeđe boje i približne dubine klizne plohe ta dubina je manja i iznosi 2,9 m. Iz sondažnih profila je vidljivo da vode u bušotinama nema (Soldo et al. 2006).

Ježovec-Strmogorica. Na ovoj lokaciji su izvršeni istražni radovi jednaki onima na lokaciji Jamno-Cari. Na ovom području je došlo do pojave klizišta ispod obiteljskih kuća. Klizište je nastalo sa podbriježne strane ceste, gdje je došlo i do samog pucanja ceste. Približne dimenzije klizišta su 60x100 m. Iz istražnih bušotina dobiveni su sondažni profili za nevedena klizišta. Prema opisu tla klizišta odnosno sondažnih profila kod čela klizišta dubina do 0,6 m je nasuti tucanik ispod asfalta, do dubine 2,5m glina smeđe boje niske plastičnosti, do 3,8 m zaglinjen pijesak žuto-smeđe boje i na dubini od 5,3m glina visoke plastičnosti žuto-smeđe boje do lapora. Kod druge istražne bušotine na čelu klizišta na dubini od 5 m evidentirana je voda. Pri nožici klizišta evidentirano je humus do 0,3 m, glina žuto smeđe boje niske plastičnosti do 3m i zaglinjen pijesak do 4,5 m, do 5 m laporovita glina. Iz ovoga se vidi da je klizna ploha na dubini od 2 do 3 m (Soldo et al. 2006).

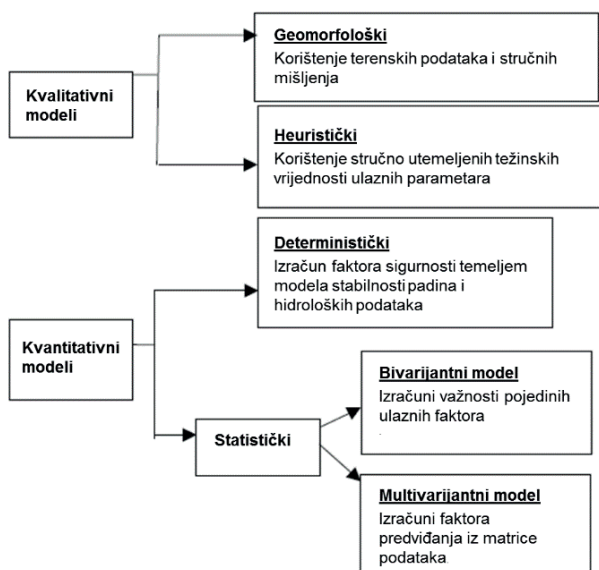
Meljan. Na lokaciji Meljan 1 i 2 prema istražnim radovima radi se o klizištima približnih dimenzija 60x70 m. Napravljena su dva uzdužna profila u odnosu na klizišta prema kojima su određena mjesta gdje je vršeno istražno bušenje. Klizište je nastalo uz cestu i za posljedicu je imalo pojavu oštećenje ceste nedaleko kuća. Prema visinskoj razlici od 10 m evidentirana je još jedna pojava klizišta na poljoprivrednoj površini kao posljedica. Iz opisa sondažnih profila vidljivo je da je do 0,7 m nasuto, do 1,9 m glina visoke plastičnosti te do 3 metra laporovita glina sa vapnencem. Klizna ploha je evidentirana na 3 m. Sondažni profil kod visinske razlike približno 20 m niže po osi klizne plohe prikazuje da je do dubine 1,1 m glina visoke plastičnosti, do 2,3 m zaglinjen pijesak sa vapnenačkim kongregacijama i od 2,3m laporovita tvrda glina. Isto tako valja napomenuti da je u toj bušotini niže kote u odnosu na samo čelo klizišta evidentirana podzemna voda na dubini od 1,3 m (Soldo et al. 2006).

3. METODOLOGIJA PROCJENE RIZIKA OD KLIZANJA

3.1. Predviđanje pojave klizišta

Prvi korak u procjeni opasnosti od pojave klizišta na nekom području predstavlja priprema i izrada karte i katastra zabilježenih klizišta. Katastar je moguće izraditi sustavnim kartiranjem područja korištenjem različitih tehnika (terenskim istraživanjem, interpretacijom aerofoto snimki, evidentiranjem starih klizišta,...). Nakon toga se može pristupiti procjeni i analizi smanjenja opasnosti od klizišta izradom karte osjetljivosti terena na klizanje. Nju je moguće dobiti temeljem podataka o: raspodjeli postojećih i saniranih klizišta, nagibu padina, vrsti stijene u podlozi, geološkim strukturama, hidrologiji... Osjetljivost se uobičajeno može kategorizirati kao niska, umjerena i visoka.

Procjene nastanka novih klizišta mogu se provesti korištenjem GIS tehnologije kroz kvalitativnu, ili kvantitativnu analizu ulaznih podataka. Shematski prikaz i kratki opis pojedinih vrsta modela prikazani su na **Slici 5**.



Slika 5. Shematski prikaz različitih modela korištenih u procjenama pojave klizišta (modificirano prema Nandi & Shakoor 2006)

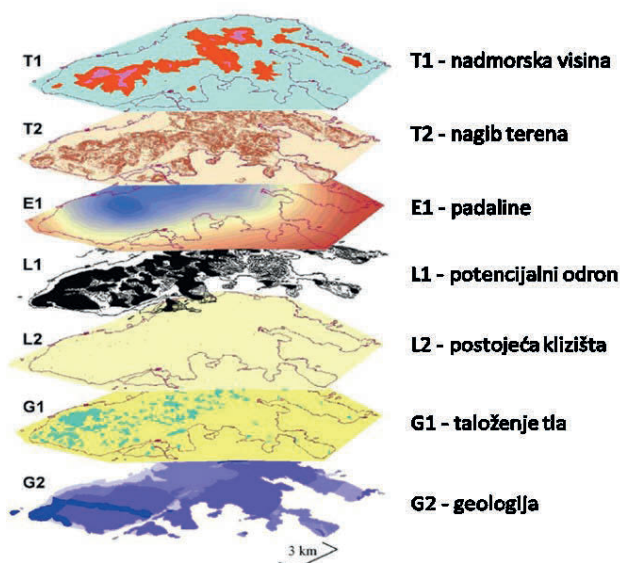
Kvalitativni pristup je široko rasprostranjena metoda koja uključuje geomorfološke i heurističke modele. Kvantitativni pristup koristi ili deterministički ili statistički model (Guzzetti et al. 1999). Determinističko modeliranje često se koristi u manjim područjima, a opasnost od pojave klizišta se izražava u obliku faktor sigurnosti. Za razliku od determinističkog modela, u statističkom modelu se faktori koji su doveli do pojave klizišta u prošlosti određuju primjenom bivarijantne ili multivarijantne statističke analize, a dobiveni rezultati se zatim koriste za predviđanje budućih pojava klizišta. Statistički pristup se temelji na promatranju odnosa između raspodjele prošlih i sadašnjih klizišta, i njihove statističke usporedbe sa svakim čimbenikom koji može utjecati na pojavu novog klizanja.

3.2. Neke od postojećih metode predviđanja klizišta korištenjem GIS tehnologije

U svijetu se koriste različite metode geoinformacijskih postupaka otkrivanja potencijalnih klizišta, odnosno zona s najvećim potencijalom mogućih pojava klizišta. U nastavku se daje kratki pregled nekoliko metoda, koje su poslužile kao baza za definiranje modela korištenog na području općine Bednja.

Prva prikazana metoda je razvijena za gusto **naseljeno područje Hong Konga u Kini** (Chau et al. 2004). Ulazni podaci za izradu modela bile su informacije o svim klizištima nastalima unutar dvanaest godina na području Hong Konga. Podaci su statistički obrađeni te je za određene prirodne karakteristike promatranog područja, za koje je pretpostavljeno da utječu na nestabilnost terena, definirana frekvencija učestalosti pojave klizanja. U modelu su u konačnici kao ulazni parametri za procjenu mogućeg nastanka klizišta korišteni nagib terena, nadmorska visina terena, geološka građa, podaci o pedologiji, i srednja godišnja količina padalina. Pojedini parametri su dodatno klasificirani, a svakoj klasi je dodijeljen i težinski faktor koji je

dodatno pojačavao ili smanjivao utjecaj pojedinih podataka. Karata potencijalnih klizišta dobila se zbrajanjem rasterskih vrijednosti pojedinih karata (Slika 6).



Slika 6. Prikaz preklapanja karata uzetih kod analize hazarda (prema Chau et al. 2004)

Područje **okruga Summit u Ohio, SAD**, poznato je po čestim pojavama klizišta uz dolinu rijeke Cuyahoga. U analizama su korišteni heuristički i statistički modeli procjene pojave klizišta, te provjera njihove učinkovitost na području Summita (Nandi & Shakoor 2006). Klizišta su identificirana aerofoto snimkama, obilaskom terena, i korištenjem postojeće literature. Analizom podataka zaključeno je da pojava klizišta na području Summita posljedica složene interakcije različitih i neovisnih čimbenika: nagiba terena, položaja nagiba, vrste tla, erodibilnosti tla, dubine do podzemne vode, korištenja zemljišta, udaljenosti od rijeke, itd. Podaci su korišteni u obliku rasterskih slojeva i analizirani upotrebom GIS tehnologije. Dobiveni rezultati su u konačnici pokazali da čimbenici poput nagiba padina, tipa tla, udaljenost od rijeke i erodibilnosti tla statistički značajno utječu na pojavu klizanja, dok ostali čimbenici nemaju tako značajnu ulogu kako se na početku pretpostavljalo, te su izuzeti iz modela.

Za slijedeću metodu područje istraživanja bio je **distrikt Wang Chin, na sjeveru Tajlanda**, a podaci o postojećim klizištima i čimbenicima koji utječu na stvaranje novih klizišta prikupljeni su daljinskim istraživanjima i terenskim obilascima, a obrađeni korištenjem GIS-a (Teerarungsigul et al. 2007). Metodologija procjene pojave klizišta bazirala se na statističkom, bivarijantnom modelu, i na pridodavanju težinskih vrijednosti pojedinim čimbenicima korištenjem GIS tehnologije. Promatrani su odnosi ukupno devet faktora koji mogu utjecati na stabilnost padina (nagib terena, položaj nagiba terena, nadmorska visina, smjer toka vode, vegetacija, korištenje zemljišta, građa tla, litologija i lineamenti), kao i dosadašnjih pojava klizišta, te njihova prostorna distribucija. Nakon analize dobivena je karta hazarda u 5 klasa.

Kao prvi slučaj primjene GIS tehnologije u analizama i procjenama osjetljivosti terena na klizanje u Republici Hrvatskoj navodi se primjer **sliva potoka Starča** (Mihalić et al. 2008) koji je smješten u brežuljkastom području Zagrebačke županije. Ulazni podaci kod ovog istraživanja bili su karta klizišta, morfološke varijable, litostratigrafska karta, karta približno lociranih klizišta, hidrogeološka karta površinskih voda i minimalna dubina do razine podzemne vode i karta površinskog pokrivača. Relativni utjecaj faktora određen je kvantitativno, pomoću statističkih analiza. Na temelju težina svakog pojedinog faktora, izabrani su najrelevantniji faktori za daljnju analizu uvjetne vjerojatnosti klizanja.

4. PROCJENA RIZIKA OD POJAVE KLIZIŠTA NA PODRUČJU BEDNJE

4.1. Postavke modela

Za pouzdanu procjenu opasnosti i rizika od pojave klizišta na području Bednje odabrana je GIS tehnologija (programski paket ArcGIS/ArcInfo), za što je bilo neophodno da različiti slojevi informacija budu uključeni u GIS sustav. Međutim, već na samom početku je veliki problem bio to što način odabira važnih nezavisnih varijabli potrebnih za analizu pojave klizišta, kao i njihov način kombiniranja još uvijek nije strogo definiran ili propisan unutar struke, tako da i dalje postoji dosta prostora i istraživačke slobode u njihovom odabiru.

Zbog toga je za izradu rada bilo potrebno prikupiti što više podataka s istraživanog područja, kako bi se temeljem kvalitetnih ulaznih podataka moglo pristupiti razradi metodologije i odabiru čimbenika za koje se iz dosadašnji istraživanja klizišta na području Bednje ispostavilo da mogu aktivno utjecati na samu pojavu klizišta. Uzimajući u obzir sve dostupne podatke, kao i postojeće metode koje se koriste u svijetu za procjenu rizika od pojave klizišta, kao konačan model za područje Bednje odabrana je kombinacija manjim dijelom kvalitativne, a većim dijelom kvalitativne statističke analize procjene rizika (Nandi & Shakoor 2006). Pritom se nastojalo model zadržati što jednostavnijim, kako bi se izbjeglo nepotrebno kompliciranje i otežavanje konačnog modela – princip Ockhamove (Occamove) oštrice.

Kvalitativni dio analize zasnivao se na dvije činjenice: (1) za procjenu rizika od klizišta korištena je empirijska procjena koji sve čimbenici mogu utjecati na pojavu klizanja, i (2) heuristička metoda procjene važnosti pojedinog čimbenika u ukupnom nastanku klizišta, odnosno određivanje težinske vrijednosti svakog pojedinog čimbenika. Ovakvim pristupom su isključeni svi oni čimbenici koji također u određenoj mjeri mogu utjecati na nastanak klizišta, ali bi u ovome slučaju više odrekli negoli pomogli jer bi nepotrebno zakomplicirali model. U budućim modelima se postojećim čimbenicima mogu pridodati i novi, ali bitno je da njihova korelacija s postankom klizišta bude jasna i mjerljiva.

U kvantitativnom dijelu analize, koristila se bivarijantna statistička metoda koja povezuje prirodu klizanja i čimbenike klizanja, te njihovu ovisnosti. Kod ove metode čimbenici klizanja se promatraju kao slučajne varijable, a podaci u njima se grupiraju u klase. Na temelju usporedbe

postojećih klizišta i pojedinih klasa podataka dobivaju se indeksi opasnosti za pojedine klase podataka. Ovime se dobiva relativan utjecaj pojedinog čimbenika klizanja na samu pojavu klizanja, odnosno mogućnost izdvajanja područja na kojem postoji velika vjerojatnost za nastanak hazarda (Mihalić 1996).

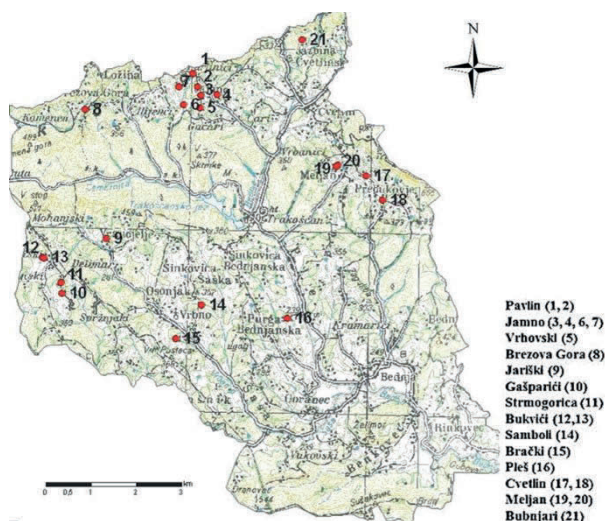
U analizama je korišten modul Spatial Analyst Tools programskog paketa ArcGIS/ArcInfo koji pruža širok raspon prostornog modeliranja i analizu značajki – od stvaranja upita, karti, analiza rasterskih podataka, izvođenja integrirane rastersko-vektorske analize, i dr. Kao ulazne podloge korištene su ortofoto snimke terena, topografske karte u mjerilu 1:5000 i geodetske točke. Iz ortofoto snimaka digitalizacijom su na istraživanome području izdvojeni šumski prostori, prometnice, vodotoci, jezera i veća naselja, te su im pridodane pripadajuće baze podataka. Temeljem geodetskih točaka izrađen je digitalni model terena koristeći modul Spatial Analyst Tools programskog paketa ArcGIS/ArcInfo i metodu Ordinary Kriging.

Kriging je napredni i složeni geostatistički postupak optimalne procjene neke varijable raspodijeljene u prostoru i mjerene na nekom konačnom broju lokacija (Royle et al. 1981; Oliver 1990; Andričević et al. 2006). U ovom slučaju procjenu površina od rasutih skupa točaka koje imaju z (visina) vrijednosti. Kriging se temelji na regionaliziranoj varijabli koja podrazumijeva da su prostorne razlike zastupljene vrijednošću z statistički homogene po cijeloj površini. Hipoteza o prostornoj homogenosti je najvažnija za teoriju regionalizirane varijable. Prostorna varijanca je kvantificirana semivariogramom. Vrijednost uzorka semivariograma za prostornu udaljenost h je prosječna razlika kvadrata u z-vrijednosti između parova ulaznih uzoraka razdvojenih točkama udaljenosti h. Uzorak semivariogram se izračunava iz uzorka podataka jednadžbom:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^N \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2$$

Kriging nudi dvije vrste površinskih procjena: obični kriging i opći kriging. Obični kriging je reprezentiran sa sfernim, kružnim, eksponencijalnim, gausovim i linearnim tipovima. Različiti modeli kriginga služe kako bi se osiguralo da su zadovoljeni potrebni uvjeti variogramskog modela (Burrough 1986; McBratney & Webster 1986).

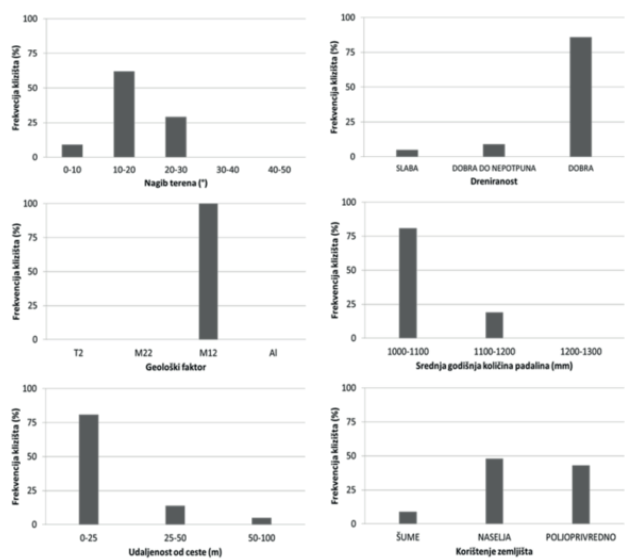
Na istraživanome području je, s obzirom na raspoložive i dostupne podatke, za potrebe modela odabran ukupno 21 lokalitet (slika 7). Pritom se nastojalo postići što ravnomjerniju raspodjelu postojećih klizišta, tako da cijelo područje bude što bolje uključeno u konačnu analizu. Naime, otežavajuća činjenica bila je početna neravnomjerna raspodjela klizišta, koja su detaljno istraživana i sanirana. Pojedini dijelovi istraživanog područja bili su izuzetno dobro obrađeni, dok za pojedine dijelove nije bilo podataka.



Slika 7. Topografska karta sa prikazom postojećih klizišta

Kao ključni čimbenici za pojavu klizišta na području Bednje u obzir su uzeti: nagiba terena, geološka građa terena, dreniranost tla i srednja godišnja količina padalina kao prirodni čimbenici koji utječu na pojavu klizišta, te korištenja zemljišta (landuse) i utjecaj prometnica, koji predstavljaju pretežno antropogene čimbenike koji utječu na pojavu klizišta na nekom području. Svaki od čimbenika je dodatnom analizom podataka podijeljen u reprezentativan broj klasa. U početku su razmatrani i neki drugi čimbenici, kao što su udaljenost od vodotoka, detaljnije pedološke karakteristike tla i sl., ali se dodatnim analizama postojećih klizišta ispostavilo da ovi čimbenici ne bi značajno utjecali na konačne rezultate, a nepotrebno bi otežavali i komplicirali postavljeni model procjene rizika na klizište.

Usporedbom postojećih klizišta i odabranih čimbenika koji mogu utjecati na njihovu pojavu, dobivena je frekvencijska razdioba klizišta na području Bednje za svaki pojedini čimbenik (Slika 8).



Slika 8. Frekvencijski raspored postojećih klizišta distribucijski raspoređenih prema različitim čimbenicima koji doprinose nastanku klizišta

Sljedeći korak je bio da se temeljem dobivenih razdioba svakoj klasi pojedinog čimbenika dodijele različite koeficijenti opasnosti od pojave klizišta, i to na način da veća vrijednost koeficijenta određuje veću opasnost od pojave klizišta (Tablica 1).

Tablica 1. Prikaz čimbenika klizanja na području općine Bednja i njihovih vrijednosti

Kategorija	Čimbenik	Klase	Koeficijent opasnosti	Težinska vrijednost
Prirodni uvjeti	Nagib terena	0-10°	3	2
		10-20°	5	
		20-30°	4	
		30-40°	1	
		40-50°	1	
	Litologija	T ₂	3	1
		M ₂₂	3	
		M ₁₂	5	
		AI	3	
		D	3	
Pedološka dreniranost	Slaba	1	1	
	Dobra	5		
Padaline	Dobra do nepotpuna	3	1	
	1000 – 1100 mm	1		
	1100-1200 mm	3		
Pretežno antropogeni utjecaj	Utjecaj prometnica prije sanacije	1200-1300 mm	5	1
		0-25	5	
		25-50	3	
	Utjecaj prometnica poslije sanacije	50-100	1	1
		0-25	-5	
		25-50	-3	
	Korištenje zemljišta	50-100	-1	1
		Šume	1	
		Naselja	5	
			Poljoprivredno	3

Pritom se vodilo računa o činjenici da sama dobivena razdioba nije presudna, već pravilan odabir važnosti čimbenika klizanja i pojave klizišta. Kod toga su od velike pomoći bili rezultati i zaključci dosadašnjih istraživanja klizišta na području općine Bednja.

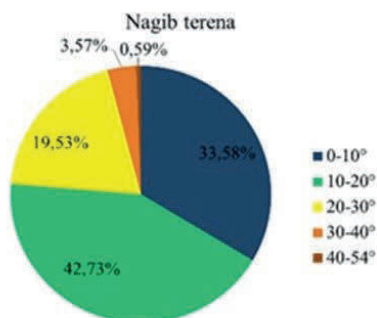
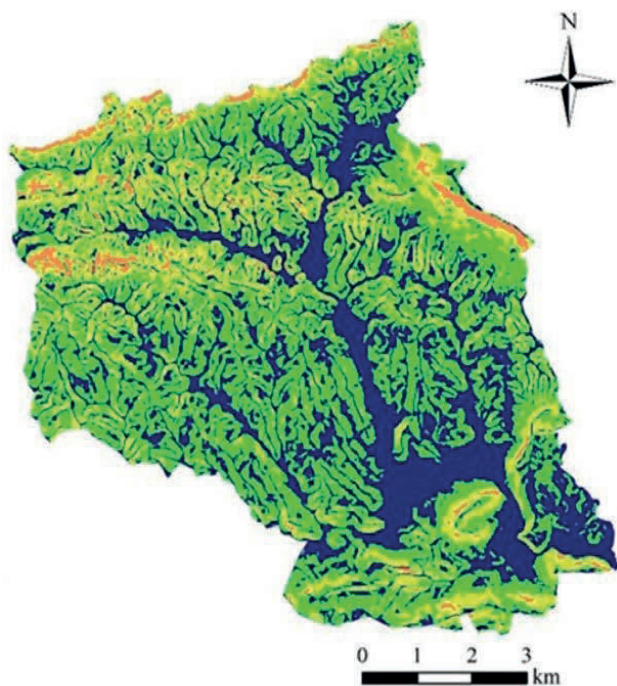
U konačnici klase označavaju jednaku raspodjelu vrijednosti određenih karakteristika pojedinog čimbenika klizanja i imaju različite koeficijente opasnosti, a težinske vrijednosti pokazuju koliki je utjecaj pojedinih čimbenika na pojavu klizanja. Prikazi klasifikacije pojedinih čimbenika prikazani su u Tablici 1.

4.2. Pregled ulaznih parametara

NAGIB TERENA. Korištenjem modula 3D Analyst Tools programskog paketa ArcGIS/ArcInfo i metode Ordinary Kriging napravljena je digitalni model terena općine Bednja. Uz pomoć modula Spatial Analyst Tools iz digitalnog modela terena dobivena je karta nagiba terena. Maksimalni nagiba terena iznosi 54°. Karta nagiba teren je zatim reklasificirana u 5 klasa i to po 10° od 0°-50° i >50°.

Nagib terena je jako važan kod promatranja potencijalnih klizišta jer se zbog same prirode nagiba može inženjerskim načinom razmišljanja zaključiti što se događa na padini prilikom stvaranja klizišta i prodora vode u tlo. Što je kut nagiba veći voda brže „sklizne“ po površini i ima manji utjecaj na stabilnost kosine. Što je kut nagiba manji, voda se lakše procjeđuje u tlo i time narušavati prirodnu stabilnost padine. Međutim, kut nagiba ne smije biti niti premali jer će u tom slučaju opasnost da dođe do narušavanja osnovnih parametara stabilnosti biti vrlo mala i neće

doći do klizišta. Na **Slici 9** je prikazana klasificirana karta nagiba terena. Svakoj klasi je dodijeljen koeficijent opasnosti od pojave klizanja, prema učestalosti pojave klizišta u odnosu na pojedinu klasu. Tako je za nagib terena od 0-10° dodijeljena vrijednost 3, za nagibe od 10-20° vrijednost 5, za nagibe od 20-30° vrijednost 4, a za nagibe od 30-40° i 40-50° vrijednost 1. Prema klasificiranim vrijednostima nagiba terena napravljen je i dijagram postotnog udjela površina pojedine klase na istraživanome području.

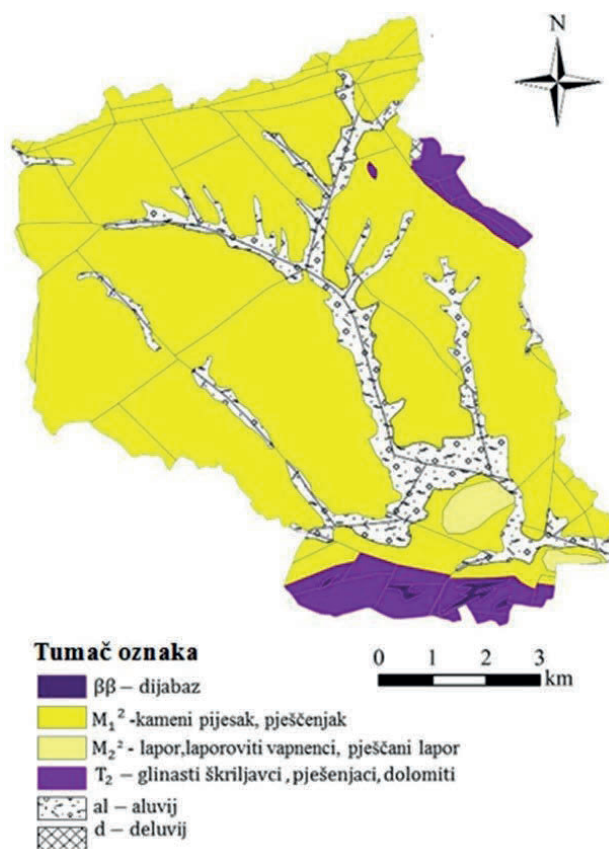


Slika 9. Klasificirana karta nagiba terena

GEOLOŠKA PODLOGA. Informacije o litološkom sastavu područja Bednje dobivene su iz Osnovne geološke karte M 1:100 000 (u nastavku OGK), listova Rogatec (Aničić & Juriša 1984) i Varaždin (Šimunić et al. 1982). Listovi OGK su digitalizirani, a pripadajuće baze podataka su popunjene prema tumačima karata i prema oznakama kartiranih jedinica.

Na istraživanome području je izdvojeno pet klasa (**Tablica 1**). Nakon klasifikacije podataka dobivena je klasificirana karta geološke podloge (**Slika 10**). Važnost geologije kod proučavanja klizišta je vrlo značajna jer se temeljem geološke podloge može odrediti o kakvim vrstama stijena se radi, odnosno iz njihovih prirodnih karakteristika donijeti zaključke o utjecaju na pojavu klizanja. Nažalost, nedostatak detaljnijih karata je bio ograničavajući element

koji je onemogućio preciznije definiranje geološke podloge istraživanog područja.

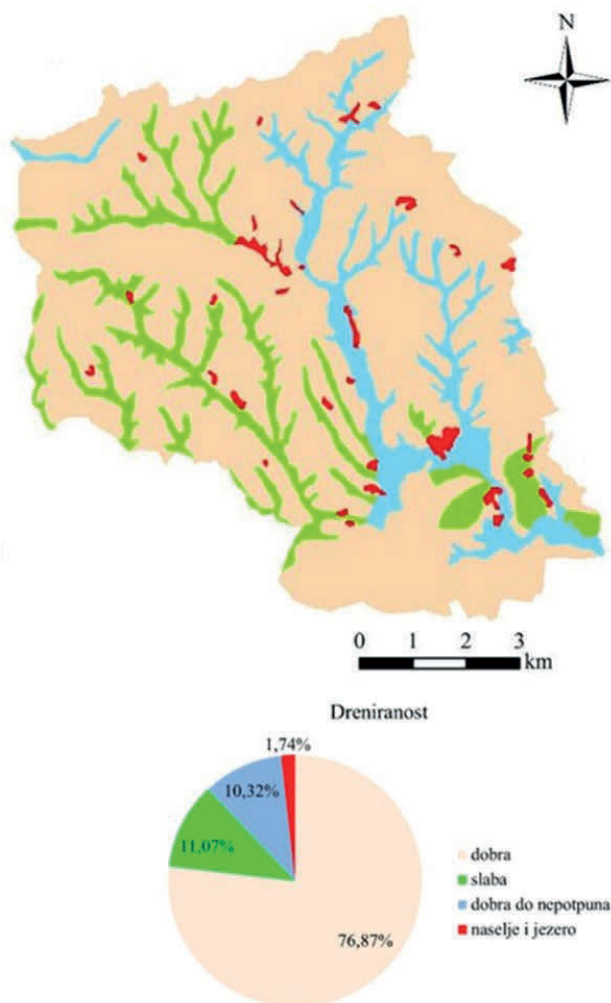


Slika 10. Klasificirana geološka podloga

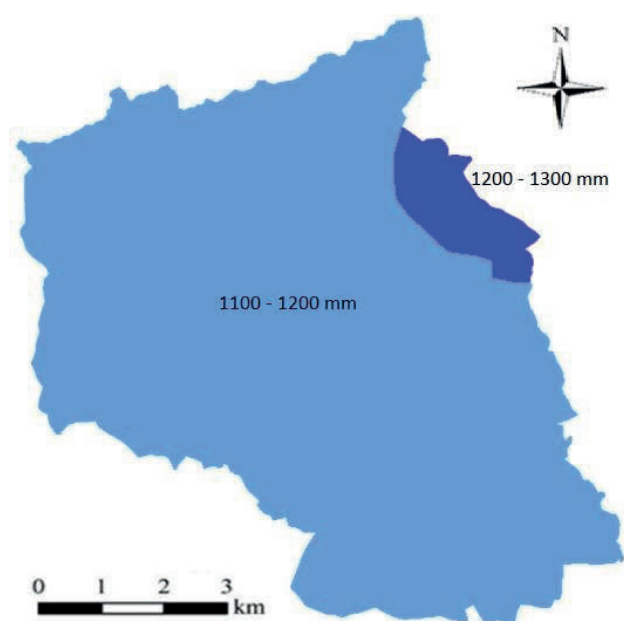
DRENIRANOST TLA. Klizišta na istraživanome području su relativno plitka, te je zbog toga u obzir uzeta pedološka dreniranost tla, jer kod dobre dreniranosti, odnosno dobre propusnosti tla dolazi do naglog povećanja pornog tlaka.

Za procjenu dreniranost tla korištena je pedološka karta, koja je izrađena specijalno za područje općine Bednja (Husnjak et al. 2012).

Dodatna voda u tlu pritom djeluje kao destabilizirajući čimbenik, odnosno negativno djeluje na stabilnost kosina. Pritom ne treba potpuno isključiti niti mogućnost pojave klizišta na području gdje je dreniranost tla lošija, jer u slučaju dugotrajnih kiša ili prilikom otapljanja snijega saturacija tla se odvija duže vrijeme pa treba uzeti i to u obzir. Međutim, količinski učinak vode na pojavu klizišta je dio prosječnih godišnjih količina padalina, koje su u analizama uzete u obzir kao zaseban čimbenik. Prema frekvencijskoj razdiobi analize su pokazale da je najveći broj klizišta upravo na području gdje je pedološki definirana dobra dreniranost tla. Na **Slici 11** je prikazana klasificirana pedološka karta općine Bednja, s obzirom na pedološki definiranu dreniranost tla. Dobivene su tri klase podataka: području slabe dreniranost tla dodijeljena je vrijednost koeficijenta opasnost od pojave klizišta 1, području dobre do nepotpune dreniranost tla vrijednost 3, a za dobro drenirana tla vrijednost 5. Prema klasificiranim vrijednostima dreniranosti tla napravljen je i dijagram postotnog udjela površina pojedine klase na istraživanome području.



Slika 11. Klasificirana karta dreniranosti tla dobivena temeljem podataka pedološke karte



Slika 12. Karta srednjih godišnjih padalina

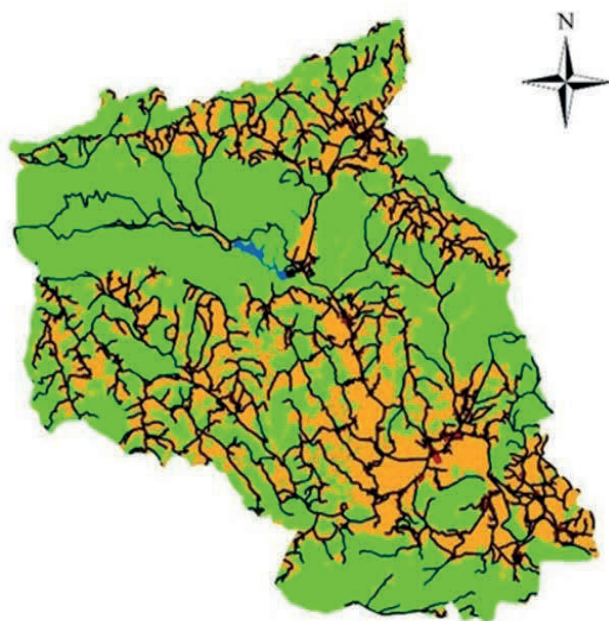
PADALINE. Srednja godišnja količina padalina dobivena je temeljem podatak iz klimatskog atlasa hrvatske (Zaninović et al. 2008). Količina padalina je dosta važan parametar kod analize klizišta jer veća količina vode, u kombinaciji s drugim čimbenicima, negativno djeluje na stabilnost kosina i uglavnom ih ubrzano destabilizira. S obzirom da je područje općine Bednja površinski relativno malo, neke veće prostorne varijacije u količini padalina nisu tako izražene. Zbog toga je bilo moguće napraviti samo dvije klase količina padalina i to na način da je području gdje su zabilježene količine padalina od 1100-1200 mm dodijeljen koeficijent opasnosti od pojave klizišta 3. Području gdje ima 1200-1300 mm padalina dodijeljen je koeficijent opasnosti 5, a uglavnom se radi o prostoru oko Ravne gore.

Bez obzira što ovaj prostor zauzima samo 5 % istraživanog područja (tamniji dio na Slici 12), unutar njega je zabilježeno više klizišta. Ipak, važno je istaknuti da su postojeći podaci o oborinama nedostadni za detaljnije analize na razini sliva te bi bilo potrebno imati podatke sa većeg broja kišomjernih postaja za dobivanje bolje raspodjele oborina u slivu.

KORIŠTENJE ZEMLJIŠTA I UTJECAJ PROMETNICA. Način korištenja zemljišta je čimbenik koji je na nekom području dijelom definiran prirodnim uvjetima (vegetacijski pokrov terena), a dijelom i antropogenim utjecajem (poljoprivredne površine, naseljena područja, prometna infrastruktura...). Na istraživanom području su digitalizacijom podataka s ortofoto snimaka mjerila 1:5000 izdvojena šumska područja, veća naselja, vodotoci, poljoprivredne površine i prometnice, a podacima su pridodane odgovarajuće baze podataka. Na Slici 13 su prikazane karte korištenja zemljišta na području općine Bednja, s tim da su na jednoj karti istaknuti i vodotoci, a na drugoj prometnice. Reklasifikacijom ulaznih podloga područja pokrivenim šumama je dodijeljena vrijednost koeficijenta opasnosti 1, poljoprivrednim površinama vrijednost 3, a naseljima vrijednost 5. Prilikom digitalizacije ulaznih podloga u obzir su uzeta samo veća naselja, dok je područje oko prometnica zonirano. Prema dobivenim vrijednostima korištenja zemljišta napravljen je i dijagram postotnog udjela površina pojedine klase na istraživanom području.

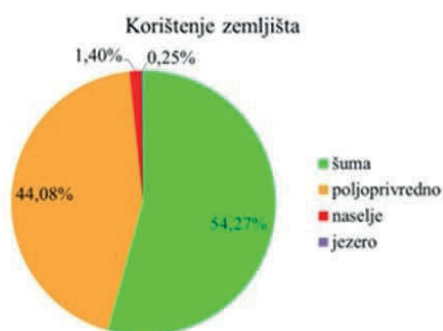
Treba napomenuti da su u daljnjim analizama utjecaji vodotoka izbačeni iz modela. Razlog tomu je što su dodatne analize podataka pokazale neznatan učinak vodotoka na konačne rezultate, te bi na kraju samo nepotrebno komplicirale postavljeni model procjene rizika od pojave klizišta na području općine Bednja.

Za razliku od utjecaja vodotoka, utjecaj prometnica na nastanak klizišta na području općine Bednja izdvojene je u konačnici kao zaseban čimbenik, i to za dva krajnja rješenja: za slučaj potpuno nesaniраних prometnica (prometnice koje nisu adekvatno izvedene i koje mogu narušiti stabilnost padine), i za slučaj potpuno saniraniх prometnica (prometnice koje su adekvatno izvedene i koje ustvari stabiliziraju padinu na kojoj se nalaze). Ovakvom analizom su dobiveni zanimljivi rezultati, koji su prikazani i objašnjeni nešto kasnije. Naime, temeljem raniji istraživanja klizišta na području Bednje pokazalo se opravdanim dodatno proučiti njihovu povezanost s nastankom nestabilnosti na padini.



Tumač oznaka

— ceste



Slika 13. Način korištenje zemljišta s istaknutim prikazom prometnica

Kod prometnica su napravljene zone udaljenosti od ceste 0-25 m; 25-50 m i 50-100 m, te su im dodijeljene vrijednosti koeficijenta opasnosti 5, 3, i 1 u slučaju kada se radilo o nesaniranim prometnicama, jer u tom slučaju one negativno utječu na stabilnost padine. U slučaju kada su u prometnice uzete pod pretpostavkom da su potpuno sanirane vrijednosti koeficijenata opasnosti su uzete iste, ali kao negativne, jer na taj način u modelu djeluju kao faktor stabilizacije padine na kojoj se nalaze.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

5.1. Karta rizika od pojave klizišta

Nakon svih potrebnih analiza i proračuna ulaznih parametara, pristupilo se njihovom međusobnom usklađivanju i preklapanju, te je u konačnici dobivena karta rizika od pojave klizišta na području općine Bednja. Shematski prikaz preklapanja rasterskih slojeva u GIS-u, a koji sadrže ulazne podatke s područja Bednje (Slika 14).

Koristeći modul Spatial Analyst Tools programskog paketa ArcGIS/ArcInfo napravljena je rasterska kalkulacija ulaznih podloga za dva varijantna rješenja, koristeći sljedeće formule:

a) za slučaj nesaniranih prometnica:

$$Nt \cdot 2 + (Li + Vo)/2 + P + Z + Cn$$

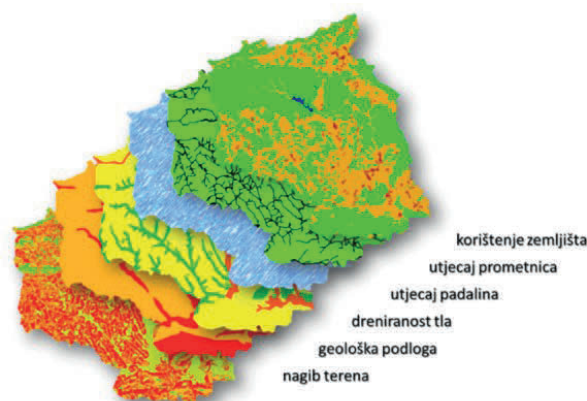
b) u slučaju sanacije svih prometnica:

$$Nt \cdot 2 + (Li + Vo)/2 + P + Z + Cs$$

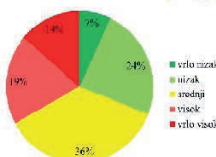
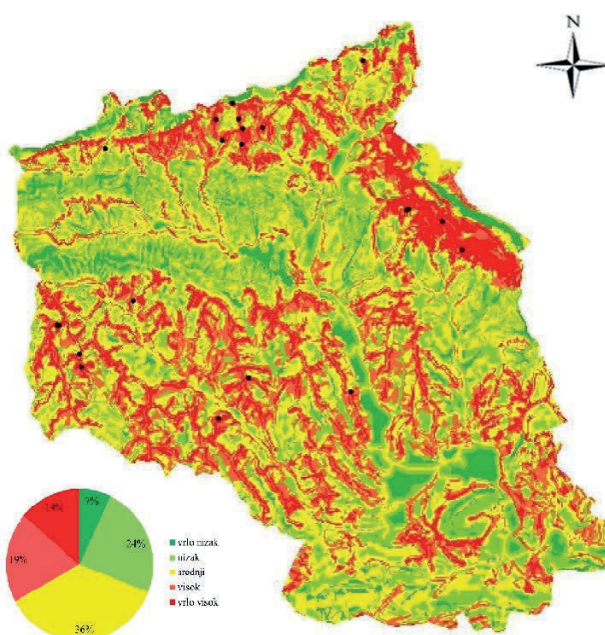
gdje je:

- Nt – utjecaj nagiba terena;
- Li – utjecaj geološke podloge (litologija);
- Vo – dreniranost tla;
- P – utjecaj padalina;
- Cn – utjecaj nesaniranih prometnica;
- Cs – utjecaj saniranih prometnica.

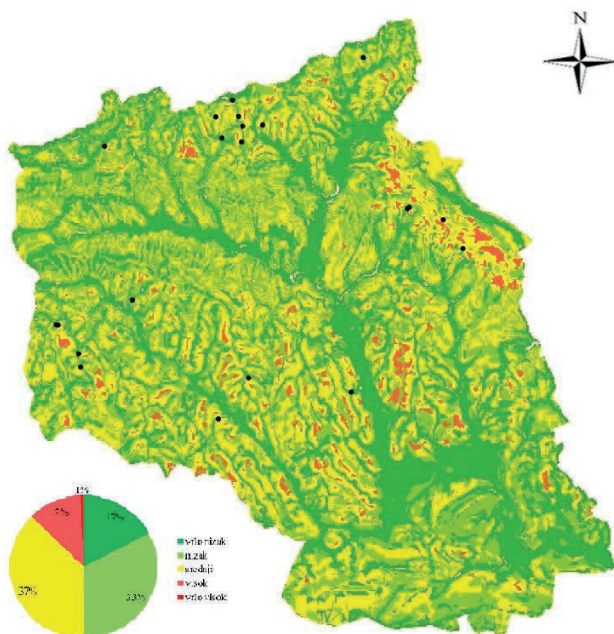
Dobivene karte su prikazane na Slikama 15 i 16.



Slika 14. Shematski prikaz preklapanja rasterskih podataka uzetih kod analiza rizika od pojave klizišta



Slika 15. Karta rizika od pojave klizišta na području općine Bednja za slučaj nesaniranih prometnica



Slika 16. Karta rizika od pojave klizišta na području općine Bednja u slučaju sanacije svih prometnica

Zanimljivo je uočiti ukupnu preraspodjelu udjela rizičnih zona za ova dva varijanta rješenja. U slučaju prve varijante, u kojoj su prometnice u modelu uzete kao destabilizirajući čimbenik, zone visokog i vrlo visokog rizika od pojave klizišta zauzimaju čak trećinu ukupne površine općine Bednja, što je zaista mnogo. Preostale dvije trećine podjednako predstavljaju srednje rizična područja, i područja s vrlo niskim ili niskim stupnjem rizika od pojave klizišta. Ovo varijantno rješenje je nažalost trenutačno i najbliže stvarnom stanju u kojemu se danas nalazi općina Bednja.

U drugom varijantnom rješenju, u kojem su prometnice u modelu uzete kao stabilizirajući čimbenik, pretpostavka je da su sve prometnice sanirane i da samim time osiguravaju stabilnost padine. Ponovljenom analizom udjela rizičnih površina dolazi se do vrlo zanimljivog rezultata. Udio srednje rizičnih površina na području općine Bednja ostaje praktički isti (oko 37%), te se može pretpostaviti da se radi o prostoru koji je prirodno uvjetovan određenom nestabilnošću padina. Ova nestabilnost ne mora dovesti do klizanja, ali i može ukoliko se promijene prirodni ili antropogeni utjecaji. Međutim, puno je bitnije uočiti preraspodjelu vrlo visoko i visoko rizičnih zona – i to u korist nisko ili vrlo nisko rizičnih zona. Zaključak je jasan – sanacijom prometnica praktički 50% površine općine Bednja bilo bi sigurno u pogledu rizika klizanja.

To ne znači da su prometnice glavni uzrok klizišta na području općine Bednja. Prije bi se moglo reći da su dobar indikator potencijalnih mjesta na kojima je postoji dosta velika vjerojatnost da će doći do klizišta. Naime, one same po sebi narušavaju stabilnost padine, ukoliko nisu pravilno izvedene. Međutim, radi se o lokalnim prometnicama. Mnogo veći problem je u činjenici da je prilično velik dio bednjanskog kraja smješten na dosta nestabilnim padinama i da praktički svaka ljudska intervencija u prostoru može izazvati pomicanje tla. A gdje se to najčešće događa? Uz ceste – i to iz jednostavnog razloga što je upravo

za ceste vezana sva infrastruktura, pa tako i izgradnja stambenih i drugih objekata koji u konačnici predstavljaju mnogo veću opasnost za stabilnost padina.

5.2. Verifikacija modela

Dobiveni model rizika od pojave klizišta na području općine Bednja verificiran je obilaskom terena, na način da su ciljano odabrane lokacije triju većih rizičnih zona na istraživanom području, za koje se temeljem prethodno provedenih studija znalo da su uspješno sanirane. Terenskom provjerom podudarnosti stvarnoga stanja i modeliranog stanja nastojalo se model popraviti, ako za to bude potrebe. Samim obilaskom terena ujedno je prikupljena i potrebna fotodokumentacija.

Odabrane lokacije bile su zaseoci Jamno, Meljan i Ježovec. Na lokacijama ovih triju zaseoka locirana su sanirana klizišta, a usporedbom dobivenih rezultata može se reći da su opravdani rezultati modela koji je u obzir uzeo pretpostavku potpune sanacije prometnica. Naime, u modelu je na takav način smanjen rizik od klizišta oko prometnica za jedan ili čak dva stupnja, pa su prethodno vrlo visoko i visoko rizične zone kategorizirane kao zone umjerene ili niske rizičnosti. Na terenu je to bilo dobro vidljivo, jer su osim same sanacije prostora u okolici saniranih klizišta uočena i brojna stara, prirodno stabilizirana klizanja terena kao i znakovi brojnih potencijalnih nestabilnosti na kosinama, čime su dodatno potvrđeni rezultati modela koji je te lokacije svrstavao u zone vrlo visokog rizika prije sanacije (Slika 17).

U nastavku su u kratko prikazane spomenute lokacije saniranih klizišta.

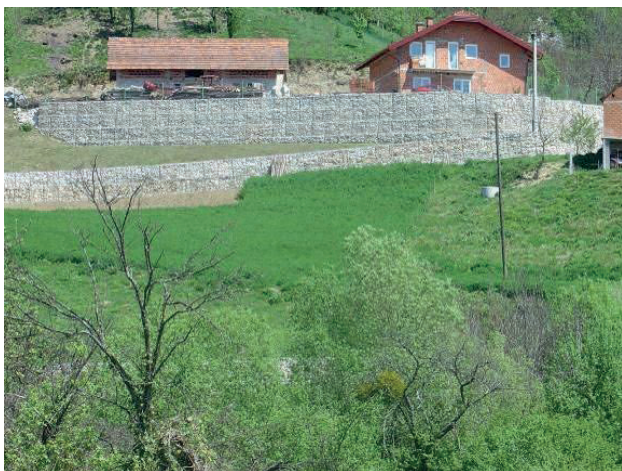
Jamno. Specifična brežuljkasta konfiguracija terena, ispreplitanje strmih obronaka, manje kućice na praktički svakom vrhu brežuljka i cijela mreža lokalnih prometnica, osnovna su obilježja ovog zaseoka. Već sam pogled na geomorfologiju cijelog prostora odaje dojam granično stabilnih padina. Za očekivati je da svaki veći zahvat ili dodatno opterećenje padina može izazvati novo klizište (Slika 17).



Slika 17. Tragovi puzanja na području Jamnog kao znak nestabilnosti padine

Obilaskom terena je potvrđena pretpostavka da se najveći broj klizišta nalazi uz cestu. U koridoru ceste nalazi se većina infrastrukturnih objekata, pa se izgradnjom novih objekata, vrlo lako može poremeti ionako slaba stabilnost kosina. Samim time ceste postaju svojevrsan indikator zona veće opasnosti od klizišta.

Meljan. Ovaj zaseok je smješten podno strmih obronaka Ravne Gore (**Slika 18**). Uspoređujući detalje dobivenih karata rizika za šire područje oko Meljana verifikacija modela pokazuje nešto slabije podudaranje sa stvarnim stanjem. Vjerojatni razlog tome je što u modelu nije na odgovarajući način uzet u obzir utjecaj podzemne vode, koji ovdje očito ima veći utjecaj negoli na ostatku bednjanskog kraja.



Slika 18. Sanacija klizišta u Meljanu s vidljiva tri reda gabionskih zidova – iza kuće je i četvrti red

Djelomičan razlog ne tako dobrih rezultata modela leži i u činjenici da se radi o području gdje nešto veće količine padalina, negoli na ostatku istraživanoga područja, dodatno otežavaju model. Time se dodatno podiže stupanj prirodne osjetljivosti na klizanje ovoga područja.

Kako je ovo jedno od rijetkih područja na kojemu je zabilježena pojava podzemne vode prilikom istražnog bušenja kod nožice klizišta, zbog nedostatka kvalitetnijih i preciznijih podataka utjecaj podzemne vode nije mogao biti dodatno razrađen i za ostala klizišta. U prilog tome ide i činjenica da je prilikom obilaska saniranog klizišta uočen veliki broj objekata za drenažu. Pri budućoj doradi modela preporuka je uzeti u obzir utjecaj podzemnih voda, za što je potrebno prikupiti puno više kvalitetnih podataka dobivenih ciljanim istraživanjima klizišta.

Ježovec. Zaseok se nalazi u zapadnom dijelu općine Bednje. Morfološki se radi o sličnom terenu kao na području Jamnog, s tim da je kod istraživanja klizišta na ovome području na čelu klizišta zabilježena pojava vode, tako da se na saniranim klizištima može uočiti i veći broja objekata za drenažu vode (**Slika 19**). Po tome je ovo područje slično onome u Meljanu. Detalji dobivenih karata rizika za područje oko Ježovca pokazuju znatno poboljšanje stanja u slučaju sanacije cesta, što ukazuje na veći utjecaj prometnica.



Slika 19. Sanacija klizišta na području Ježovca

6. ZAKLJUČAK

Na području općine Bednja nalazi se veliki broj klizišta, potencijalnih klizišta, odnosno nestabilnih padina. Osnovni cilj rada je pokušati predvidjeti potencijalno najugroženije zone u kojima se klizišta mogu pojaviti. To je moguće postići preklapanjem različitih prostornih podataka korištenjem GIS tehnologije. Stoga je bilo potrebno prikupiti što veći broj različitih podataka o području općine Bednja, iz kojih su kasnije odabrane samo one podloge koje mogu koristiti u modelu rizika od pojave klizišta.

Za pouzdaniju procjenu opasnosti i rizika pojave klizišta, različiti slojevi informacija moraju biti uključeni u GIS sustav. Međutim, način odabira važnih nezavisnih varijabli potrebnih za analizu pojave klizišta, kao i njihov način kombiniranja još uvijek nije strogo definiran ili propisan unutar struke, tako da i dalje postoji prostor za daljnja istraživanja. Namjera ovog rada je da se istakne mogućnost upotrebe GIS tehnologije u procjeni i predviđanju mjesta nastanka klizišta, te da se predloži metodologija za procjenu rizika od pojave klizišta. Metodu je moguće implementirati i na druga područja, ako se postojeće varijable upotpune kvalitetnim podacima novog područja, ali bitno je da njihova korelacija s postankom klizišta bude jasna i mjerljiva.

Kao ključni čimbenici za pojavu klizišta na području općine Bednja u obzir su uzeti: nagib terena, geološka građa terena, dreniranost tla i srednja godišnja količina padalina, kao prirodni čimbenici koji utječu na pojavu klizišta, te korištenje zemljišta (landuse) i utjecaj prometnica, koji predstavljaju pretežno antropogene čimbenike koji utječu na pojavu klizišta na nekom području. Rezultat istraživanja u konačnici predstavlja karta rizika od pojave klizišta na području općine Bednja. Dobivene vrijednosti predstavljaju relativne, a ne apsolutne razine rizika. Model je verificiran terenskim obilaskom ciljano odabranih lokacija većih rizičnih zona, za koje se temeljem prethodno provedenih studija znalo da su uspješno sanirane. Dobivena karta može poslužiti kao dobra osnova za detaljniju procjenu rizičnih područja u općini Bednja (Počekal 2012). Izdvajanje rizičnih zona i njihovo adekvatno uključivanje u prostorne planove može pridonijeti smanjenju o-

pasnosti od nastanka klizišta, a samim time i socioekonomske gubitke općine Bednja. Ovo je primjer kako neka općina može za vlastite potrebe napraviti kartu rizika od klizišta i na temelju toga razvijati daljnju politiku razvoja područja.

7. ZAHVALA

Zahvaljujemo djelatnicima Zavoda za hidrotehniku, Geotehničkog fakulteta kao i Geotehničkom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu na financijskoj potpori.

8. LITERATURA

Andričević, R., Gotovac, H., Ljubenković, I. (2006): Geostatistika: umijeće prostorne analize. Udžbenici Sveučilišta u Splitu. Sveučilište u Splitu, Građevinsko – arhitektonski fakultet

Aničić, B. i Juriša, M. (1984): Osnovna geološka karta SFRJ M 1 : 100 000. List Rogatec, L 33-68. Karta i Tumač. Savezni geološki zavod, Beograd

Burrough, P.A. (1986): Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. New York: Oxford University Press

Chau, K.T.; Sze, Y.L., Fung, M.K., Wong, W.Y., Fong, E.L., Chan, L.C.P. (2004): Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Državni zavod za statistiku, DZS (2011): Stanovništvo prema starosti i spolu po naseljima, popis 2011, Zagreb – mrežna veza:

http://www.dzs.hr/Hrv/censuses/census2011/results/htm/H01_01_01/h01_01_01_zup05_0124.html

Husnjak, S., Čmelik, Z., Striber, N. (2012): Pogodnost poljoprivrednog zemljišta za voćarstvo na području općine Bednja. 47th C 60 Croatian and 7th International Symposium on Agriculture, Opatija, Croatia, 60-64

McBratney, A.B., Webster, R. (1986): Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates. *Journal of Soil Science*, 37, 617–639

Mihalić, S. (1996): Zoniranje po opasnosti od klizanja-hazard klizanja. Magistarski rad, Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

Mihalić, S., Vujnović, T., Škrinjar, G., Mihaliček, B., Martinić, J., Markovinović, T. (2008): Ublažavanje opasnosti od klizanja - zoniranje osjetljivosti na klizanje. Savjetovanje Zagrebačke vode, Zagreb

Nandi, A., Shakoor, A. (2006): Preparation of a landslide susceptibility map of Summit County, Ohio, USA, Using numerical models, IAEG Paper number 660

Oliver, M.A. (1990): Kriging, A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *Int. Journal of Geographic Information Systems*, Vol. 4, No. 4. 313–332

Počekal, N. (2012): Geoinformacijski postupci otkrivanja potencijalnih klizišta. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin

Royle, A.G., Clausen, F.L.; Frederiksen, P. (1981): Practical Universal Kriging and Automatic Contouring. *Geoprocessing*, 1:377–394

Soldo, B., Ivandić, K., Rezo, M., Golub, I., Zidar, M., Težak, I., Štuhec, D., Agnezović, K., Orešković, M. (2006): Geotehnički elaborat o istražnim radovima na klizištima u općini Bednja istražni radovi i proračuni, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin

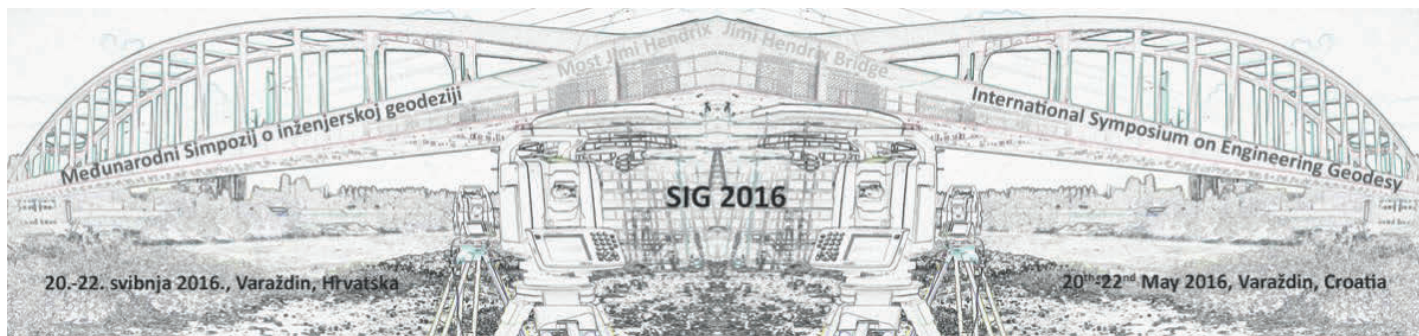
Soldo, B., Orešković, M. (2009): Stabilization of slopes in the expansion of road II. BiH Kongres o cestama, Sarajevo, 24 – 25.9.2009.

Soldo, B., Orešković, M., Štuhec D. (2010): An Example of Weather Impact on A Hilly Landscape. BALWOIS 2010 - Ohrid, Republic of Macedonia - 25, 29 May

Šimunić, A., Pikića, M., Hećimović, I. (1982): Osnovna geološka karta SFRJ M 1 : 100 000. List Varaždin, L 33-69. Karta i Tumač. Arhiv Hrvatskog geološkog instituta, Zagreb

Teerarungsikul, S., Chonglakmani, C., Kuehn, F. (2007): Landslide prediction model using remote sensing, GIS and field geology: A case study of Wang Chin district, Phrae province, Northern Thailand. International Conference on Geology of Thailand: Towards Sustainable Development and Sufficiency Economy, Geothai

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katusin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnc, L., Vučetić, V. (2008): Klimatski atlas Hrvatske, 1961. - 1990. : 1971. - 2000. Monografija, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 200 str.



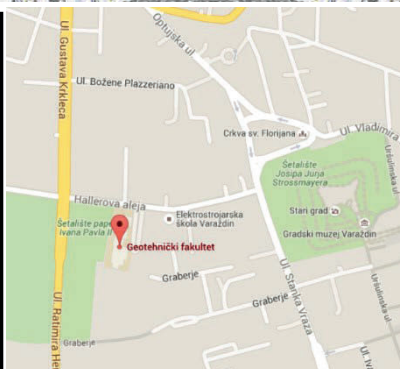
Croatian Geodetic Society
Faculty of Geodesy,
University of Zagreb

SIG 2016

Symposium on Engineering Geodesy

<http://www.hgd1952.hr/>

20th-22nd May 2016
Varaždin, Croatia



Organizacijski odbor:

1. Doc. dr. sc. Milan Rezo, predsjednik, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet
2. Prof. emeritus dr. sc. Zdravko Kapović, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet
3. Prof. dr. sc. Damir Medak, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet
4. Dr. sc. Marko Pavasović, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet
5. Dr. sc. Danijel Šugar, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet
6. Doc. dr. sc. Mladen Zrinjski, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet
7. Mr. sc. Marija Brajković, Istarski vodovod d. o. o., Buzet
8. Mr. sc. Vladimir Jakopec, Sveučilište Sjever

Organising committee:

1. Assis. Prof. Milan Rezo, president, University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering
2. Prof. Emeritus Zdravko Kapović, University of Zagreb, Faculty of Geodesy
3. Prof. Damir Medak, University of Zagreb, Faculty of Geodesy
4. Dr. Marko Pavasović, University of Zagreb, Faculty of Geodesy
5. Dr. Danijel Šugar, University of Zagreb, Faculty of Geodesy
6. Assis. Prof. Mladen Zrinjski, University of Zagreb, Faculty of Geodesy
7. MSc. Marija Brajković
8. MSc. Vladimir Jakopec



Međunarodna udruga geodeta
Hrvatsko geodetsko društvo
Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

SIG 2016

Međunarodni simpozij o inženjerskoj geodeziji

<http://www.geof.unizg.hr/sig2016/>

20. – 22. svibnja 2016.
Varaždin, Hrvatska



ZAŠTITA PODZEMNIH VODA – PRIMJER PROCJENE RANJIVOSTI SLIVA IZVORA GRADOLE (HRVATSKA) METODOM SINTACS

GROUNDWATER PROTECTION - AN EXAMPLE OF VULNERABILITY ASSESSMENT OF THE GRADOLE SPRING CATCHMENT AREA (CROATIA) USING SINTACS METHOD

Maja Mlinarić, Jelena Loborec^{1*}, Ranko Biondić¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za hidrotehniku, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: jloborec@gfv.hr

Sažetak: Zaštita izvorišta pitke vode u Hrvatskoj se provodi na način da se štite priljevna područja tih izvorišta različitim razinama zaštite i različitim ograničenjima ljudske aktivnosti u tim zonama ovisno o razini zaštite. Kriteriji određivanja zona, kao i sam postupak donošenja zaštite podzemnih voda na priljevnom području izvorišta pitke vode određeni su na nacionalnoj razini zakonskom legislativom. Pojedine zemlje osim klasičnih hidrogeoloških istraživanja u metodologiju određivanja zaštitnih zona uvode i procjene prirodne ranjivosti vodonosnika kao jednu od podloga za kvalitetnije donošenje zaštitnih zona, ali i kvalitetnije određivanje ograničenja ljudskog djelovanja koje se donose za pripadajuće zone. U Hrvatskoj, primjena kartiranja prirodne ranjivosti nije obvezna metoda istraživanja kod određivanja zona sanitarne zaštite, ali u svakom slučaju pruža dodatne podloge kojima se kvalitetnije može odrediti zaštita nekog slivnog područja.

U radu je prikazana primjena kartiranja prirodne ranjivosti metodom SINTACS kod procjene učinkovitosti zaštite podzemnih voda u slivu izvora Gradole. Izvor Gradole je najveći zahvaćeni krški izvor u Istri te je nezamjenjiv izvor pitke vode za stanovništvo tog područja. Iz tog razloga vrlo je važno njegovo priljevno područje štiti na odgovarajući način kako bi se rizik od onečišćenja podzemne vode na tom području sveo na najmanju moguću mjeru. Kartiranje prirodne ranjivosti ukazalo je na dva područja na koja treba usmjeriti detaljna hidrogeološka istraživanja. To su: područje oko ponora Čiže koje je ocijenjenom klasom ekstremne ranjivosti (budući da tamo nema nikakvog zaštitnog pokrova, a ima stalnu podzemnu vodnu vezu s izvorom Gradole) i dio oko ponora u Tinjanskoj dragi, gdje je zahvaljujući slabije propusnim naslagama zemlje crvenice ranjivost ocijenjena kao vrlo visoka. Glavnina sliva ocijenjena je kao vrlo visoko i visoko ranjiva jer je građen od dobro do srednje propusnih stijena. Jedino se sjeveroistočni dio sliva nalazi u niskoj i vrlo niskoj klasi ranjivosti jer ga izgrađuje nepropusni fliš. Dobiveni rezultati mogu poslužiti u svrhu preciznije definicije pojedinih zona zaštite izvorišta Gradole.

Ključne riječi: Gradole, krški vodonosnik, prirodna ranjivost, SINTACS, zone zaštite.

Abstract: Protection of drinking water sources in Croatia is carried out in a way to protect the catchment area of these sources on different levels of protection and different limitations of human activities in these zones based on the level of protection. Criteria zoning, as well as the procedure of making the protection of groundwater inflow to the area of drinking water sources, are defined at the national level statutory legislation. Some countries, besides the classic hydrogeological research, in the methodology for determining protection zones have included the intrinsic vulnerability of aquifers assessment as one of additional tools for better definition of protection zones, but also for better determination of the limits of human activity that are made for the corresponding zone. In Croatia the use of intrinsic vulnerability mapping is not compulsory research method for determining the sanitary protection zones, but it provides additional information that can better the protection of a catchment area.

The paper describes the application of SINTACS method for intrinsic vulnerability mapping when assessing the effectiveness of the groundwater protection in the catchment area of Gradole spring. Gradole spring is the biggest captured karst spring in Istria and is an indispensable source of drinking water for the population of that area. For this reason, it is very important to protect the catchment area adequately so that the risk of groundwater contamination is reduced to a minimum. Mapping of intrinsic vulnerability pointed out the two areas on which more detailed hydrogeological research should be focused. These are: the area around the Čiže ponor which is evaluated as extremely vulnerable (since there's no protective cover and a permanent groundwater connection with a source Gradole) and part around the ponor in Tinjanska draga, where, thanks to the layers of red soil with lower permeability, vulnerability is rated as very high. Most of the basin has been assessed in very high and high vulnerability class because it is composed of good to medium permeable rock. Only the north-eastern part of the basin is assess as low and very low vulnerable because it is composed of impermeable flysch layers. The results can advantageously be used for more precise definition of Gradole spring water protection zones.

Keywords: Gradole, karst aquifer, intrinsic vulnerability, SINTACS, protection zones

Received: 25.04.2016 / Accepted: 17.05.2016

Published online: 04.07.2016

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Metode procjene ranjivosti postaju uobičajeni alat za zaštitu podzemnih voda, posebno u krškim područjima. Zaštita izvorišta pitke vode u Hrvatskoj se uobičajeno provodi definiranjem različitih zona zaštite unutar kojih su propisane aktivne mjere zaštite, a koje se odnose na ograničenja ljudskih aktivnosti ovisno o razini zaštite. Kriteriji određivanja zona, kao i sam postupak donošenja zaštite podzemnih voda na priljevnom području izvorišta pitke vode određeni su na nacionalnoj razini zakonskom legislativom, u Hrvatskoj je to Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011, 47/2013). Neke europske države procjenu ranjivosti uvrstile su u svoju zakonsku regulativu kao jednu od obaveznih metoda istraživanja kod definiranja zona sanitarne zaštite izvorišta pitke vode (npr. Švicarska – metoda E-PIK, Velika Britanija – metoda GOD, Kanada – metoda AVI). Hrvatska za sada još nije među njima, ali i kod nas se sve češće ovakve metode koriste provode u sklopu kompleksnih hidrogeoloških istraživanja (Biondić R. 2005; Meaški 2011; Kapelj et al. 2012; Loborec 2013; Biondić R. et al. 2014, 2016).

Upravo zbog toga je cilj ovoga rada pokazati mogućnost primjene jedne od metoda procjene prirodne ranjivosti u analizi zaštite krškog izvorišta, za koje su definirane zone sanitarne zaštite, te u skladu s dobivenim rezultatima predložiti moguća poboljšanja vezana uz samu zaštitu izvorišta.

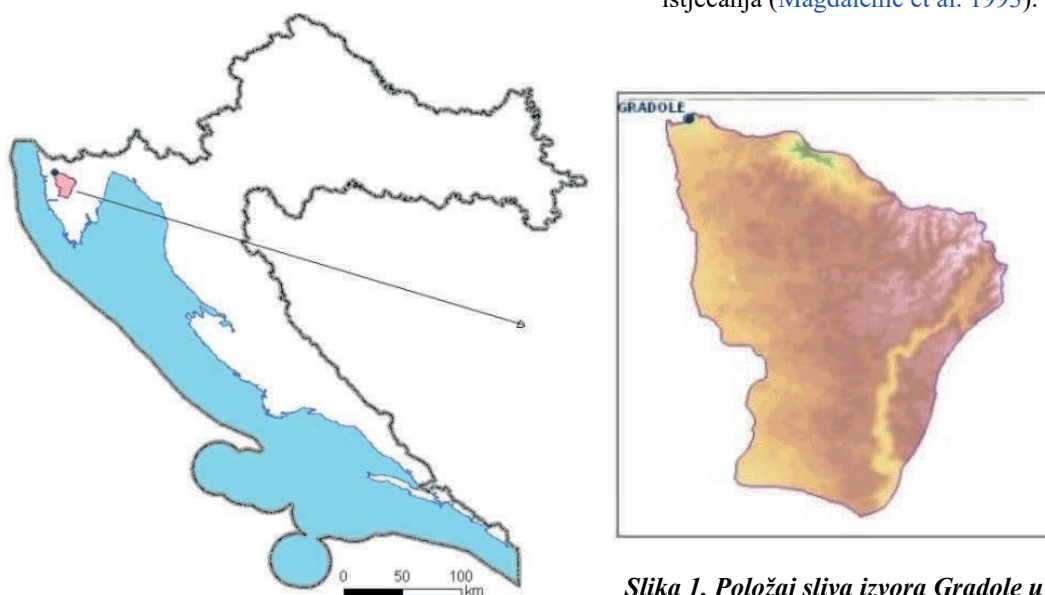
- Kao metoda procjena prirodne ranjivosti odabrana je SINTACS metoda (Civita & De Maio 1997, 2000), uz pomoć koje se proučavanjem prirodnih karakteristika svih dijelova vodonosne sredine (površinske naslage, nesaturirana zona i saturirani dio) nastoje izdvojiti oni dijelovi sliva koji su ranjiviji na negativne antropogene utjecaje. Danas u literaturi postoji mnogo primjera primjene SINTACS metode na različitim područjima (Janža & Prestor 2002; Corniello et al. 2004; Mali & Janža 2005; Civita et al. 2008; Kapelj et al. 2012; Biondić, R. et al. 2014).

- Za krški sliv je odabran sliv izvora Gradole koji je najveći zahvaćeni krški izvor u Istri. Vodocrpilište Gradole se nalazi u sjeverozapadnom dijelu istarskog poluotoka te za sada na njemu nisu zabilježene značajnije pojave antropogenog opterećenja. Da bi se stanje visoke kakvoće podzemne vode održalo nužno je provođenje kvalitetnog upravljanja. To uključuje striktno provođenje mjera zaštite u pojedinim zonama sanitarne zaštite, izgradnju sustava javne odvodnje u uzvodnom dijelu sliva i pročišćavanja otpadnih voda prije upuštanja u okoliš, kao i sanaciju onečišćivača prema zadanim prioritetima. Upravo zbog toga bi se ukazivanjem na ranjivije dijelove sliva stavio naglasak na područja kojima je potrebna jača zaštita, stroži nadzor i kvalitetno upravljanje. Dijelovi sliva koji bi se pokazali manje ranjivima mogli bi se namijeniti za aktivnosti koje imaju nešto veći stupanj opasnosti za narušavanje kakvoće podzemne vode.

2. ISTRAŽIVANO PODRUČJE

2.1. Geografski smještaj

Sliv izvora Gradole nalazi se na Istarskom poluotoku, najvećem hrvatskom i jadranskom poluotoku (Slika 1), kao dio šireg sliva rijeke Mirne. To je najduža i vodom najbogatija istarska rijeka, dužine 53 km, koja izvire u jugozapadnom dijelu Ćićarije, južno od Huma, a blizu Novigrada utječe u Jadransko more. Prema Planu upravljanja vodnim područjima Republike Hrvatske (NN 82/13) sliv izvora Gradole spada u Jadransko vodno područje, a nalazi se unutar cjeline podzemne vode Sjeverna Istra. Izvor Gradole je ključno i najveće vodocrpilište na Istarskom poluotoku. Kaptirano je za vodoopskrbu istarskih gradova, a dio vode se cjevovodima odvodi i u susjednu Republiku Sloveniju (Rižanski vodovod Koper). Ukupna srednja godišnja količina istjecanja je preko 2 m³/s, a godišnje se za potrebe vodoopskrbe koristi u prosjeku 0,55 m³/s, odnosno preko 17 milijuna m³ vode, što je oko 27 % ukupnih količina istjecanja (Magdalenić et al. 1993).



Slika 1. Položaj sliva izvora Gradole u Republici Hrvatskoj

Istraživano područje se nalazi u području sredozemne klime. U slivu nema niti jednog kišomjera, a najbliži su Višnjani, Motovun i Pazin koji se nalaze oko 2 km od vanjskih granica sliva izvora Gradole. Nalaze se na nadmorskim visinama od 244 do 291 m n.m. s prosječnim višegodišnjim količinama oborina od 988 mm (Višnjani), 1034 mm (Motovun) i 1168 mm (Pazin). Oborinski režim nije ni na ovom nevelikom porastu homogen, što predstavlja dodatni problem prilikom izrada hidroloških analiza. Pretpostavi li se da je srednja visina sliva izvora Gradole oko 340 m n. m. proizlazi da se srednja višegodišnja oborina kreće u rasponu od 1046 do 1120 mm. Slično je i s podacima o srednjoj godišnjoj transpiraciji. Jedini dostupni podaci su s mjernih postaja Pazin i Rovinj. Za potrebe ove analize podaci o oborinama i evapotranspiraciji korišteni su iz Klimatskog atlasa Hrvatske (Zaninović et al. 2008).

2.1. Hidrogeologija istraživanog područja

Izvor Gradole (Slika 2) je tipičan krški uzlazni izvor formiran u kontaktnoj zoni dobro vodopropusnih karbonatnih stijena kredne starosti i klastičnih naslaga kvartarne starosti u dolini rijeke Mirne. Voda izbija iz pukotine uz rub kvartarnih naslaga, a preljevnice vode izvora odvođene se kanalima prema rijeci Mirni. Uz izvor Gradole, u neposrednoj blizini, nalaze se još i izvori Male Gradole i Očjak. Za izvor Gradole su karakteristične oscilacije izdašnosti u rasponu od 0,3 do 18,3 m³/s. Relativno velika izdašnost izvora u sušnom razdoblju ukazuje na složene procese otjecanja podzemnih voda, odnosno na činjenicu da u istjecanju na izvoru Gradole sudjeluju znatno veće površine napajanja, odnosno da sudjeluju znatno širi regionalni tokovi (RGN 2003). Po svojoj izdašnosti u sušnom razdoblju to je ujedno i najveći izvor na istarskom poluotoku.



Slika 2. Izvor Gradole

Izvor drenira karbonatnu zaravan između rijeke Mirne i Limske drage. Za određivanje vanjskih granica sliva u obzir su uzeti podaci o geologiji, tektonici, morfologiji, fotogeološkoj interpretaciji terena, hidrogeološkim karakteristikama stijena, krškim morfološkim pojavama i podacima dobivenih trasiranjima podzemnih tokova (Magdalenic et al. 1993; Magdalenic et al. 1995; Biondić B. et al. 1999; Biondić R. et al. 2004). Istraživano područje je pretežno izgrađeno od naslaga kredne, paleogenske te

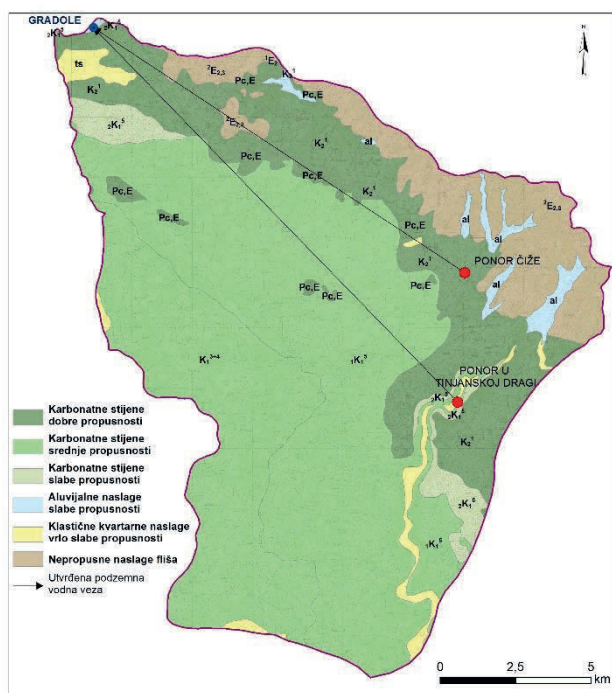
eocenske i kvartarne starosti. Karbonatne stijene, vapnenci i dolomiti, su pretežito kredne starosti dok su naslage paleogenske starosti pretežito klastične naslaga te manjim dijelom vapnenci. Za naslage eocenske starosti su karakteristične naslage fliša. Dio ovih naslaga lokalno je prekriven kvartarnim naslagama – potočnim ili riječnim nanosima (aluvij) i crvenicom. Promatrani geološki tipovi stijena imaju različite hidrogeološke značajke. S obzirom na propusnost, na području sliva moguće je izdvojiti pet osnovnih skupina stijena (Tablica 1).

Tablica 1. Hidrogeološke vrste stijena

Vodopropusnost	Osnovni opis stijene	Poroznost
Dobro propusne karbonatne stijene	Slojeviti do gromadasti vapnenci gornjokredne starosti te vapnenci paleogenske starosti	Pukotinska poroznost i okršenost
Srednje propusne karbonatne stijene	Brečasti vapnenci, pločasti do škriljavi vapnenci	Dominira pukotinska poroznost.
Slabo propusne stijene i naslage	Naslage donjokredne starosti u kojima se uz vapnence pojavljuju i dolomiti te vapnenci s proslojcima lapora; aluvijalne naslage kvartarne starosti.	Pukotinska poroznost kod karbonata i međuzrnska poroznost kod kvartarnih naslaga
Slabo propusne naslage	Klastične naslage zemlje crvenice kvartarne starosti.	Međuzrnska poroznost
Nepropusne naslage	Klastične fliške naslage (lapori i pješčenjaci).	Vrlo slabo izražena poroznost

Na istraživanom području postoji više jama dubokih preko 100 m, ali nijedna ne dopire do razine podzemne vode, što ukazuje na postojanje dubokog krškog vodonosnika (Magdalenic et al. 1993; Magdalenic et al. 1995). Usprkos velikom broju vrtača, jama i pukotina, mali je broj pojava u koji stalno dotječe voda na području sliva izvora Gradole. Najznačajnije rezultate dala su trasiranja ponora Čiže i ponora u Tinjanskoj dragi, gdje je utvrđena podzemna vodna veza s izvorom Gradole i na temelju kojih je utvrđen dominantni smjer toka podzemnih voda paralelan pružanju rasjednih struktura JI – SZ. Trasiranjima ponora Čiže, izvedenim uz različite

hidrološke uvjete dokazano je da je glavna drenažna zona kojom je usmjeren velik dio vode iz glavnog vodonosnika južne Istre u središnjem dijelu poluotoka od ponora Čiže do izvora Gradole. Glavni smjer kretanja podzemnih voda je JI – SZ, tj. prema rijeci Mirni, a podudara se s pružanjem struktura i smjerovima glavnih rasjednih sustava (Slika 3). Temeljem dokazanih podzemnih veza ponora Čiže i izvora Gradole u različitim hidrološkim uvjetima pojavila se je ideja umjetnog prihranjivanja izvora Gradole vodom iz susjednog sliva (akumulacija Butoniga) upojem u ponor Čiže (Magdalenić et al. 1993).



Slika 3. Shematska hidrogeološka karta područja sliva izvora Gradole

2.3. Postojeća zaštita izvorišta Gradole

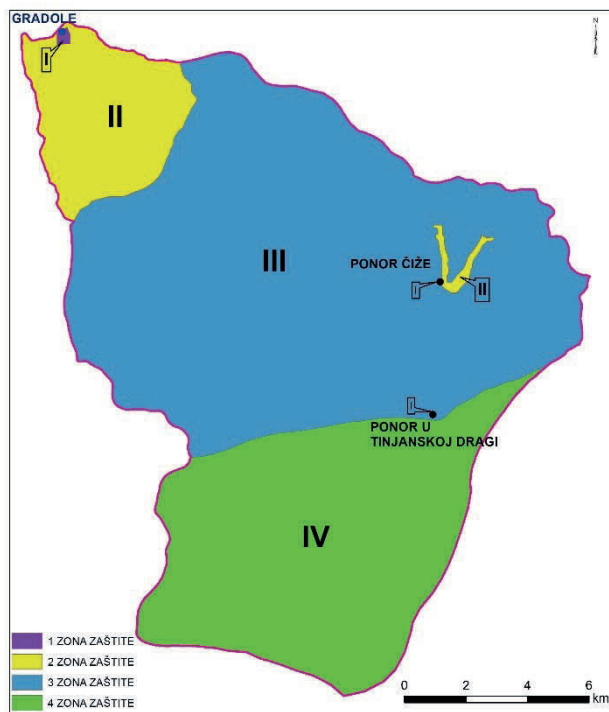
Tijekom 2003. godine provedena je analiza svih postojećih podataka, elaborata i studija, GIS-a Istre, te podataka iz aktivnog projekta za prekogranične vodonosnike hrvatsko-slovenskog graničnog područja i postojećih elaborata o zaštitnim zonama (RGN 2003). Cilj i namjena provedenih analiza je bilo usklađenje zaštitnih zona i mjera zaštite na cijelom prostoru Istarske županije, odnosno izrada novelirane podloge za donošenje jedinstvene Odluke o zonama sanitarne zaštite na području Istarskog poluotoka. Prijedlog zona sanitarne zaštite izvorišta vode za piće na području Istre, a time i za izvor Gradole je napravljen temeljem analize svih postojećih dostupnih podataka, ali bez dodatnih terenskih istraživanja (RGN 2003), u skladu s Pravilnikom o utvrđivanju zona sanitarne zaštite (NN 55/2002) koji je tada bio važeći.

Spomenuta analiza zaštitnih zona izvorišta Gradole napravljena je temeljem studije „Sliv izvora Gradole u Istri – Zone sanitarne zaštite“ (Magdalenić et al. 1993) koje je i bila osnovna stručna podloge, a u okviru koje je hidrološkim bilanciranjem i hidrogeološkom analizom dobivenih podataka procijenjena površina sliva od oko 104

km². Dobivena slivna površina je kasnijim analizama procijenjena kao mnogo veća, odnosno oko 170 km² površine hipotetičkog potencijalnoga sliva (Rubinić 1995) iz čega proizlazi da bi ukupna površina sliva koja u cjelini ili dijelom gravitira izvoru Gradole trebala biti značajnije veća od predložene u spomenutom elaboratu iz 1993. godine

Analizom podataka u sklopu studije iz 2003. godine (RGN 2003) slivna površina izvora Gradole, a time i površina zaštitnih zona izvora Gradole je znatno povećana te iznosi oko 235 km² jer se prema mišljenju autora (RGN 2003) u zaštiti ovog važnog izvorišta išlo na stranu sigurnosti, a što je s hidrološkog stanovišta puno prihvatljivije. Međutim, zaštitne zone izvorišta su ponovno zbog nedostatka trasiranja određene samo temeljem preliminarnih obrada količine napajanja izvorišta.

U skladu s provedenom analizom (RGN 2003) dat je i novi prijedlog zaštitnih zona (Slika 4). Prva zaštitna zona izvora Gradole ostala je nepromijenjena te i dalje obuhvaća samo izvorište i zaravan u zaleđu izvorišta na kojem su smješteni objekti za preradu vode. Objekti su izgrađeni na propusnim vapnencima te predstavljaju nepovoljnu stranu u zaštiti izvora. Druga zaštitna zona zauzima površinu od oko 23 km², a treća zaštitna zona površinu od oko 139 km². Unutar treće zaštitne zone nalazi se ponor Čiže, koji je predviđen kao objekt za umjetno napajanje podzemne vode i izvora Gradole. Ponorno područje je zaštićeno prema kriterijima za I. zonu, a doline koje gravitiraju ponoru su svrstane u II. zonu zaštite (površine oko 1 km²). Četvrta zaštitna zona zauzima površinu od oko 73 km².



Slika 4. Postojeće zaštitne zone izvora Gradole

3. PROCJENA PRIRODNE RANJIVOSTI SLIVA IZVORA GRADOLE SINTACS METODOM

Metoda procjene ranjivosti SINTACS razvijena je 90-ih godina u Italiji (Civita & De Maio 1997) po uzoru na američki DRASTIC (Aller et al. 1987). Autori ove metode željeli su predložiti model za procjenu ranjivosti koji bi bio primjenjiv na području cijele Italije, bez obzira na tip vodonosnika, kako bi rezultati bili usporedivi. Kroz godine se prvotno predložen sustav procjene nadopunjavao na temelju iskustava, primjenom metode na različitim područjima. Predlagane su novije, poboljšane verzije sve do 2000. godine kad je predložena verzija SINTACS R5 (Civita & De Maio 2000). Prema toj verziji, procjena ranjivosti se temelji na vrednovanju sedam parametara (Tablica 2) i na sustavu od pet težinskih koeficijenata. Parametri se konvertiraju pomoću predloženih dijagrama, tablica, raspona i izračuna u raspone vrijednosti od 1 do 10, gdje veća vrijednost parametra označava veću ranjivosti vodonosnika.

Tablica 2. Prikaz SINTACS parametara i njihovog značenja

S	Dubina do podzemne vode (S1)
I	Djelovanje efektivne infiltracije
N	Kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni
T	Kapacitet razrjeđenja u tlu/pokrovnim naslagama
A	Hidrogeološka obilježja vodonosnika
C	Raspon hidrauličke vodljivosti vodonosnika
S	Hidrološka uloga nagiba terena (S2)

Dobivene vrijednosti parametara se na kraju množe s težinskim koeficijentom koji ukazuje na odnos između parametara i njihove važnosti kod procjene ranjivosti, u zavisnosti o uvjetima na području vodonosnika. Postoji pet težinskih sustava za različite scenarije, kojima se definiraju težinski koeficijenti svakog pojedinog parametra, kako bi se procijenjeni parametri što bolje uklopili u hidrogeološke značajke vodonosnika i antropogeno opterećenje na površini promatranog područja (Tablica 3).

Tablica 3. Vrijednosti težinskih faktora u SINTACS metodi

Scenarij	Težinski koeficijent pojedinog parametra						
	S	I	N	T	A	C	S
Normalni uvjeti	5	4	5	4	3	3	2
Veliko opterećenje	5	5	4	5	3	2	2
Procjeđivanje	4	4	4	2	5	5	2
Krš	2	5	1	3	5	5	5
Raspucale stijene	3	3	3	4	4	5	4

Zbroj težinskih faktora u svakoj koloni iznosi 26. Svaka od kolona predstavlja drugačije uvjete (Civita & De Maio 2000). Konačan rezultat je vrijednost indeksa ranjivosti po SINTACS metodi koji se svrstava u intervale preko kojih se prikazuje relativan stupanj ranjivosti.

$$I_{V(\text{SINTACS})} = I_{V(\text{SINTACS})} = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot W_i$$

gdje P_i predstavlja parametre SINTACS metode, a W_i težinske faktore.

Dobivene veće vrijednosti indeksa ranjivosti ukazuju na veću ranjivost, dok manje ukazuju na manju ranjivost vodonosnika (Tablica 4).

Tablica 4. Kategorije i rasponi ranjivosti dobiveni SINTACS metodom

Vrijednosti	Klasa ranjivosti	Boja na karti
> 210 - 260	Ekstremna	
> 186 - 210	Vrlo visoka	
> 140 - 186	Visoka	
> 105 - 140	Srednja	
> 80 - 105	Niska	
45 - 80	Vrlo niska	

Svaki od parametara SINTACS metode potrebnih za analizu prirodne ranjivosti sliva izvora Gradole zahtijevao je zasebnu pripremu ulaznih podataka koji su prikupljeni iz različitih izvora. Stoga je bilo vrlo važno prikupiti i proučiti rezultate do sada provedenih istraživanja na području sliva kako bi se što vjerodostojnije pripremili ulazni podaci. Neka istraživanja se do sada nisu provodila na području ovog sliva (mjerenja razina podzemne vode, nedostatak postavljenih meteoroloških postaja, detaljnija raspodjela pokrova tla, prostorna diferencijacija hidrauličke vodljivosti stijena, itd.) te je za određivanje parametara veza njih uz te podatke bilo potrebno napraviti procjene pri čemu su iskustvo istraživača i dobro poznavanje terena presudni. Kako su neki podaci interpolirani i procijenjeni, točnost SINTACS metode je u nekim segmentima grublja. Metodu uvelike poboljšavaju težinski faktori koji su određeni za svaki od sedam parametara u metodi SINTACS (Tablica 3). Preko težinskih faktora metoda je prilagođena krškom sustavu, stoga je i utjecaj pojedinih parametara na ukupan rezultat prilagođen krškim uvjetima.

Korištene su sljedeće podloge: topografske podloge Republike Hrvatske M 1:25 000 koje pokrivaju istraživano područje; Osnovna geološka karta listovi Rovinj (Polšak & Šikić 1969; Polšak & Šikić 1973) i Trst (Pleničar et al. 1969; Pleničar et al. 1973) M 1:100 000; Hidrogeološka karta sliva M 1:100 000 (Biondić B. et al. 1999); Hidrogeološka karta Republike Hrvatske M 1:300 000 (Vidaček et al. 2004); Karta oborina Republike Hrvatske M 1:300 000 (Zaninović et al. 2008).

Topografske karte korištene su kao podloga za digitalizaciju slojnica, kota, vodnih objekata, te spilja, jama i ponora. Iz digitaliziranim slojnica izrađen je digitalni model reljefa (DEM – Digital Elevation Model) u „grid“ formatu, raster veličine ćelija 25x25 metara (Slika 4A). DEM je polazni format preko kojeg je prostornim modeliranjem

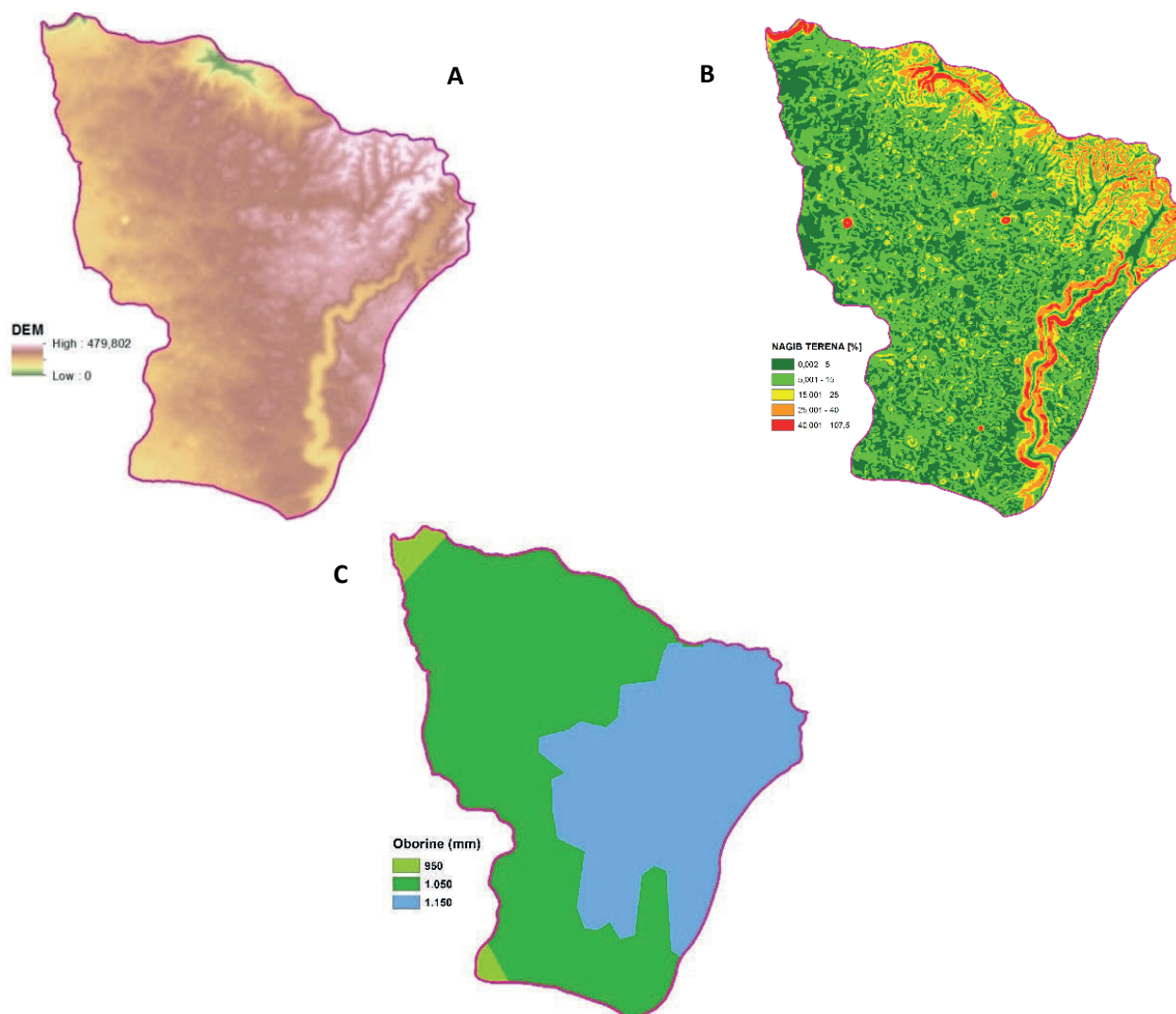
GIS alatima izrađena karta nagiba terena (Slika 4B), a poslužio je i kod definiranja dubina do podzemne vode (Mlinarić 2014).

Hidrogeološka karta osnovna je podloga kod procjene ranjivosti krškog vodonosnika jer definira konceptualni model dinamike vode u kršu. Također, podaci o osnovnim hidrogeološkim jedinicama na slivu korišteni su kod parametara koji definiraju svojstva vodonosnika.

Hidropedološka karta Republike Hrvatske, mjerila 1:300 000 (Vidaček et al. 2004) korištena je za definiranje osnovnih svojstava tla na istraživanom području potrebnih kod određivanja utjecaja tla na ranjivost vodonosnika, kao i kod određivanja utjecaja efektivne infiltracije. Iako zbog nazivnog mjerila nije primjerena za detaljne analize pojedinih slivova korištena je u ovom radu jer nisu bila dostupna detaljnija istraživanja tog tipa.

Iz Klimatskog atlasa Republike Hrvatske (Zaninović et al. 2008) korištena je karta oborina iz koje su digitalizirani podaci za područje sliva izvora Gradole. (Slika 4C). Raspon oborina u slivu izvora Gradole kreće se u rasponu od 950 mm do 1150 mm. Podaci o evapotranspiraciji su također korišteni iz Klimatskog atlasa Republike Hrvatske (Zaninović et al. 2008).

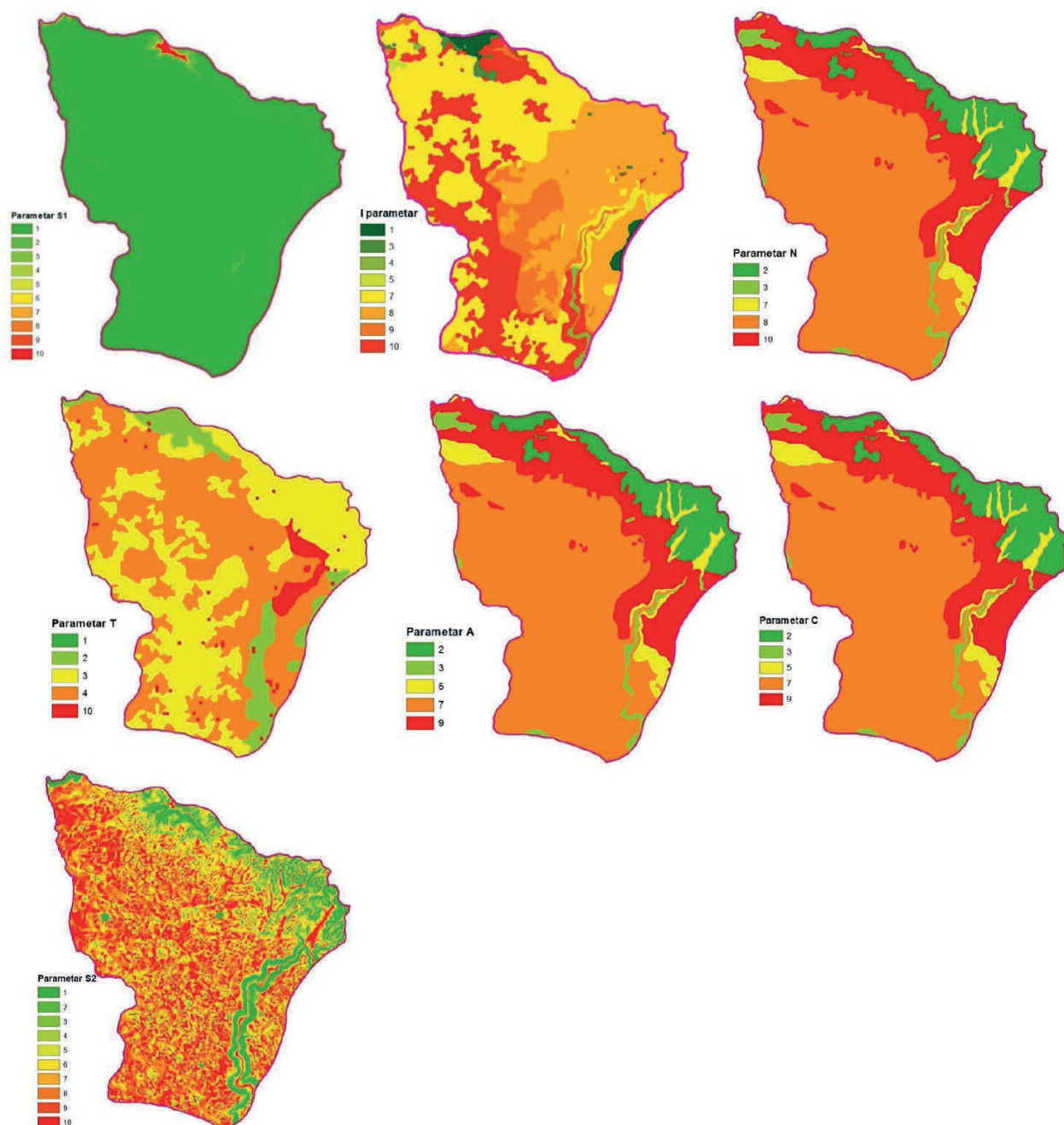
Procjene prirodne ranjivosti uobičajeno se provode uz pomoć GIS alata, prvenstveno alata vezanih za upravljanje podacima (*Data Management Tools*), zatim alata za vektorske analize (*Analysis Tools*) te alati za rasterske prostorne analize (*Spatial Analyst Tools*). Kombinacija spomenutih alata omogućuje upravljanje prostornim podacima i njihovim atributima, izrada kartografskih prikaza, ali i provođenje različitih prostornih analiza i modeliranja. Jedan od primjera provedene kompleksne prostorne GIS analize je određivanje parametra S_1 – dubine do podzemne vode. Kako podataka o mjerenim vrijednostima podzemne vode na području sliva nema, do vrijednosti parametra S_1 bilo je potrebno doći indirektnom metodom. Najprije je interpolacijskim metodama dobiven hidraulički gradijent između ponora Čiže i Tinjanska draga te izvora Gradole i izvora u Limskom kanalu. Pri tome je dio s nepropusnim fliškim naslagama predstavljen kao područje bez vode. Rasterskom analizom, upotrebom *Raster Calculatora* oduzete su vrijednosti kota terena iz digitalnog modela reljefa i apsolutnih kota razina podzemne vode te je dobiven raster dubina do podzemne vode čime je omogućena definicija vrijednosti parametra S_1 . Sažeti opis dobivanja vrijednosti ostalih parametara prikazan je u Tablici 5.



Slika 4: Neke od podloga koje su korištenu u analizi: DEM (A), karte nagiba terena (B), karta srednjih godišnjih oborina u slivu (C)

Tablica 5: Način dodjeljivanja vrijednosti pojedinih parametara u slivu izvora Gradole

S ₁	Opisano u tekstu		1 – 10
		χ	1 – 10
	Slučaj 1: $I=(P-Et) \cdot X_{stijena}$		
	dobro propusni vapnenci	0.85	
	srednje propusni klastični vapnenci	0.7	
	slabo propusni dolomitni vapnenci	0.55	
	slabo propusni aluvij	0.3	
	slabije propusna crvenica	0.2	
	nepropusni fliš	0.12	
	Slučaj 2: $I=P \cdot X_{tlo}$		
gline	0.02		
ilovača	0.15		
N	dobro propusni vapnenci		10
	srednje propusni klastični vapnenci		8
	slabo propusni dolomitni vapnenci i aluvij		7
	zemlja crvenica		3
	nepropusni fliš		2
T	gole stijene	0	10
	ilovača	>200 cm	3
	glina	>200 cm	1
	glina	90 cm	2
	ilovača (do 25cm)	80 cm	4
	ilovača	60 cm	5
	glina	50 cm	2
	glina	40 cm	3
A	dobro propusni vapnenci		8
	srednje propusni klastični vapnenci		7
	slabo propusni dolomitni vapnenci i aluvij		5
	slabije propusna crvenica		3
	nepropusni fliš		2
C	dobro propusni vapnenci		9
	srednje propusni klastični vapnenci		7
	slabo propusni dolomitni vapnenci i aluvij		5
	slabije propusna crvenica		3
	nepropusni fliš		2
S ₂	Nagib terena [%]		
	0 - 3		10
	3 - 5		9
	5 - 7		8
	7 - 10		7
	10 - 13		6
	13 - 17		5
	17 - 19		4
	19 - 23		3
	23 - 27		2
> 27		1	



Slika 5: Prostorni prikaz dobivenih SINTACS parametara na slivu izvora Gradole

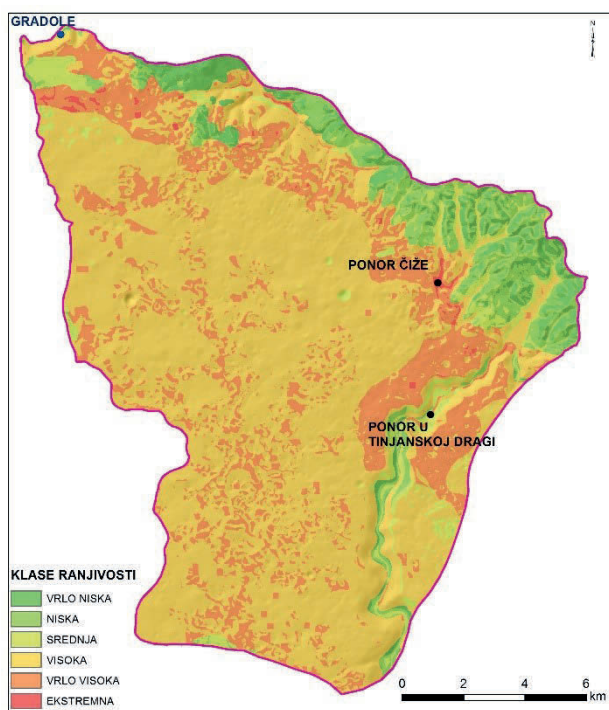
Dobiveni parametri SINTACS metode (Slika 5) su prema uputama metode pomnoženi s odgovarajućim težinskim faktorima. Kako se sliv izvora Gradole nalazi u krškom području, primijenjen je težinski faktori za krška područja: S1-2, I-5, N-1, T-3, A-5, C-5 i S2-5, te je formula za izračun indeksa ranjivosti (I_v – vulnerability index) prema formuli:

$$I_{v(SINTACS)} = (S1 \cdot 2) + (I \cdot 5) + (N \cdot 1) + (T \cdot 3) + (A \cdot 5) + (C \cdot 5) + (S2 \cdot 5)$$

Temeljem dobivenih rastera svakog pojedinog parametra SINTACS metode i njihovih težinskih faktora, raster-skom analizom dobiven je raster prostorne raspodjele vrijednosti indeksa ranjivosti sliva izvora Gradole. Indeks

ranjivosti klasificiran je prema propisanim rasponima, u šest klasa ranjivosti, a različiti stupanj ranjivosti prikazan je na karti ranjivosti (Slika 6) različitom bojom.

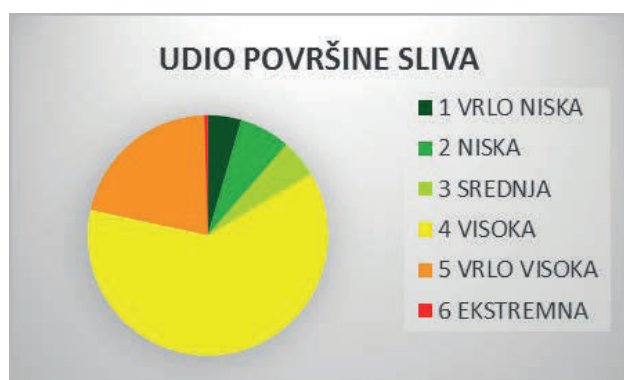
Prema dobivenoj karti SINTACS metodom (Slika 6) koja prikazuje ranjivost vodonosnika u slivu izvora Gradole, te prema odnosu površina sliva zahvaćenih pojedinom klasom ranjivosti, prikazani u Tablici 6 i na Slici 7, vidljivo je da se većina sliva nalazi u visokoj i vrlo visokoj razini ranjivosti, prvenstveno zbog hidrogeoloških karakteristika stijena koje ga izgrađuju, a to su dobro propusne karbonatne stijene. Sjeveroistočni dio sliva se nalazi u vrlo niskoj i niskoj razini ranjivosti zbog toga jer se u tom dijelu sliva nalazi nepropusni fliš, sa slojevima slabije propusne zemlje crvenice koja također ima izraženu sposobnost zadržavanja onečišćenja.



Slika 6: Karta prirodne ranjivosti sliva izvora Gradole prema SINTACS metodi i težinskim faktorima za krš

Tablica 6: Rezultati procjene prirodne ranjivosti

KLASA	RANJIVOST	POVRŠINA (km ²)
1	VRLO NISKA	10,7
2	NISKA	16,2
3	SREDNJA	12,1
4	VISOKA	146,5
5	VRLO VISOKA	50,0
6	EKSTREMNA	1,1



Slika 7: Rezultati procjene prirodne ranjivosti

SINTACS je metoda koja daje veliki raspon klasa ranjivosti. Zbog toga je omogućena kvalitetna usporedba ranjivosti u slivu. Općenito metoda djeluje na način da su ranjivija područja ona koja po svojim prirodnim karakteristikama imaju manju prirodnu zaštitu na površini,

u nezasićenoj zoni vodonosnika i dinamikom podzemne vode unutar samog vodonosnika. Upotrebom težinskih faktora koji su prilagođeni krškom okruženju, metoda naglašava utjecaj pojedinih parametara na konačni rezultat procjene ranjivosti. Tako u ovom slučaju daje na važnosti infiltraciji kod konačnog izračuna zbog toga što je jako važno da li voda prolaskom u podzemlje zaobilazi zaštitnu funkciju pokrovnih naslaga ili ju u pravoj mjeri uspijeva iskoristiti. Isto tako maksimalan težinski faktor dodan je i hidrauličkoj vodljivosti te interpretaciji hidrogeoloških značajka vodonosnika kao i nagibu terena, sve zbog važne uloge koju ovi parametri imaju na formiranje tokova u kršu (Mlinarić 2014).

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Sliv izvora Gradole je dio sliva rijeke Mirne i najvažnije je vodocrpilište poluotoka Istre, pogotovo za vrijeme ljetnih sušnih razdoblja. Stoga je iznimno važno kvalitetno zaštititi sliv izvora Gradole na odgovarajući način, kako bi se i dalje mogle koristiti strateške rezerve vode iz izvora, bez nepotrebnog ograničavanja razvoja ovog područja. U radu je prikazana postojeća zaštita izvorišta Gradole, procjena ranjivosti krškog vodonosnika SINTACS metodom na području sliva izvora Gradole, te usporedba ovih dvaju pristupa u zaštiti krškog izvorišta. Usporedba postojećih zona zaštite i zona ranjivosti dobivenih SINTACS metodom uočeni su određeni nerazmjeri. To se prvenstveno odnosi na preciznije definiranje određenih problematičnih dijelova koji su se pojavili analizom ranjivosti unutar pojedine definirane zone zaštite, čime se dobiva finija raspodjela štićenih područja i sprječava nepotrebno ograničavanje aktivnosti. Sve to može se pomiriti korištenjem različitih pristupa u analizi zaštite izvorišta Gradole.

Naime, postojeći Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011, NN 47/2013), ali i stari Pravilnik o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 55/2002) prema kojem je i napravljena zaštita izvorišta Gradole, propisuju provedbu vodoistražnih radova kao i izradu Elaborat zona sanitarne zaštite. Vodoistražni radovi su stručno najznačajniji stupanj, jer se određuju zaštitni prostori, dinamičko funkcioniranje krških vodonosnika, dimenzije sliva itd, a podrazumijevaju geološka, hidrogeološka, hidrološka, hidrogeokemijska i kemijska istraživanja. U slučaju da svi vodoistražni radovi nisu provedeni, ili nisu dostatni, potrebno je napraviti dodatna istraživanja.

Kod izvora Gradole zaštitne zone su određene temeljem hidrološke i hidrogeološke studije iz 1993. godine (Magdalenić et al. 1993) koje je bila osnovna stručna podloga te 2003. godine dodatnom analizom postojećih podataka (RGN 2003). Međutim, zaštitne zone izvorišta su ponovno određivane samo temeljem preliminarnih obrada količine napajanja izvorišta bez provedbe dodatnih trasiranja. U skladu s tim, moguće je da su pojedine zone zaštite predimenzionirane.

Što se same SINTACS metode tiče, ona u svojoj procjeni uključuje sedam parametara te se zbog toga naizgled čini dosta precizna, ali istovremeno i komplicirana. Kod pripreme podataka koji su potrebni za definiranje parametara SINTACS metode nailazi se na nekoliko poteškoća. Naime, metoda zahtijeva precizno određene veličine koji

ulaze u konačan izračun indeksa ranjivosti, a do takvih podataka je teško doći, posebice u kršu. Potrebna je dobra interpretacija i aproksimacija postojećih podataka te dobro poznavanje programa (ESRI ArcGIS u ovom slučaju) kako bi se na što bolji način odredili ulazni podaci potrebi kod izračuna parametara, kao što su: poznavanje dubine do podzemne vode, infiltracija, debljina pokrova, hidraulička vodljivost... Kako bi se svi ti podaci dobro definirali važno je dobro odrediti geološke i hidrogeološke značajke promatranog sliva. Ipak, i dobrim poznavanjem terena pretpostavke su grube jer krš sam po sebi je zahtjevan teren, heterogen i anizotropan, te je svaka interpolacija ujedno i aproksimacija. Metodu poboljšavaju težinski faktori kojima se na kraju množi svaki parametar. Težinski faktori maksimalno omogućavaju prilagodbu metode površinskim uvjetima u slivu.

Kao dobra provjera metode procjene prirodne ranjivosti i postojećeg sustava određivanja zaštitnih zona mogu poslužiti određene mikrolokacije u krškom slivu. U slučaju istraživnog područja treba istaknuti činjenicu da su osim samog izvora Gradole važni dijelovi sliva i dva ponora: Čiže i Tinjanska draga koji su prema postojećim zonama zaštite u visokoj I. odnosno II. zoni zaštite izvorišta Gradole. Prema odabranoj SINTACS metodi usko područje oko ponora Čiže kao i sam ponor Čiže su ocijenjeni kao ekstremno ranjivi. U prilog dobivenim vrijednostima ide i činjenica kako je utvrđena podzemna vodna veza tog ponora s izvorom Gradole. Međutim, za razliku od ponora Čiže, ponor Tinjanska draga i područje oko ponora Tinjanska draga je ocijenjeno s ranjivošću vrlo visokog stupnja. Naime, oko ponora Tinjanska draga nalazi se površinski pokrov zemlje crvenice koja je slabije propusna od okolnog područja, ali također, zbog svojih geokemijskih karakteristika ima izraženu sposobnost zadržavanja onečišćenja. Iz tog razloga ona pruža svojevrstu zaštitu samom ponoru, tako da prema SINTACS metodi ovo područje nema ekstremnu ranjivost. Sam izvor Gradole i područje oko izvora Gradole (**Slika 6**) ocijenjeno je prema SINTACS metodi kao srednje do visoko ranjivo. Razlog tome je što oko izvora postoji veliki broj rasjeda, pukotina, vrtača i jama koje karbonatne naslage čine u cijelosti propusnim stijenama. Općenito su na području čitavog sliva problematični dijelovi bez kontinuiranog pokrova tla, pogotovo u kombinaciji s dobro propusnim vapnencima.

Ukupno gledajući, pomoću SINTACS metode procijenjena je prirodna ranjivost u slivu izvora Gradole na zadovoljavajući način. Na slivu su izdvojena ranjivija područja upravo na mjestima gdje postoje stroge zone sanitarne zaštite: izvor Gradole, ponori Čiže i Tinjanska draga. Ostatak sliva ima različite stupnjeve ranjivosti, tj. dijelovi su više ili manje prirodno zaštićeni od utjecaja potencijalnog onečišćenja, što može pomoći kod preciznijeg definiranja zona sanitarne zaštite na temelju prirodnih obilježja vodonosnika u odnosu na trenutno važeće zone sanitarne zaštite izvora Gradole. U skladu s navedenim, moguće je da se SINTACS metodom dobiju za pojedine dijelove sliva krive procjene stvarnih uvjeta. Međutim, u svijetu postoje i mnoge druge metode procjene prirodne ranjivosti te bi se pažljivim odabirom i kalibracijom modela mogli postići mnogo bolji rezultati.

Važno je istaknuti da bilo koja metoda procjene ne može zamijeniti ni jedno drugo istraživanje. Koristi se kao

vrlo koristan, ali isključivo dodatni alat u kompleksnim hidrogeološkim istraživanjima. Time se povećava količina znanja o istraživanom području i omogućuje kvalitetnije upravljanje i učinkovitija zaštita krških vodonosnika.

5. LITERATURA

Aller, J.R., Bennet, T., Feheer, J.H., Petty R.J. & Hackett G. (1987): DRASTIC, a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. US EPA 600/2-87-035

Biondić B., Kapelj S., Kuhta M., Biondić, R., Dukarić, F., Larva, O., Terzić, J. & Singer, D. (1999): Vodnogospodarska osnova Republike Hrvatske, GIS Istre, Hidrogeologija, Zagreb

Biondić, R., Kapelj, S., Rubinić, J., Marković, T., Singer, D., Horvat, B. & Kukuljan, I. (2004): Granični vodonosnici Hrvatske i Slovenije između Kvarnerskog i Tršćanskog zaljeva. Završni elaborat II. Faze istraživanja. Institut za geološka istraživanja, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju Zagreb

Biondić, R. (2005): Zaštita voda gornjega dijela sliva Kupe. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 171 str., Zagreb.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2014): Vulnerability mapping of Novljanska Žrnovnica karst spring catchment area in Croatia. Final report. Arhiv Geotehničkog fakulteta

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2016): Karst Aquifers Vulnerability Assessment (KAVA) method applied to the Bakar Bay catchment area in Croatia. Final report. Arhiv Geotehničkog fakulteta

Civita, M., & De Maio, M. (1997). SINTACS: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia delle vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automatizzazione.

Civita M. & De Maio M. (2000): SINTACS R5, a new parametric system for the assessment and automating mapping of groundwater vulnerability to contamination – Pitagora Editor (Bologna), 226 str.

Civita M., Pezdich J. & Uhan J. (2008): Ocenjevanje ranjivosti podzemne vode z metodo SINTACS v Spodnji Savinjski dolini, Slovenija, Ljubljana

Corniello A., Ducci D. & Monti G.M. (2004): Aquifer pollution vulnerability in the Sorrento Peninsula, Southern Italy, evaluated by SINTACS method. Geofis. Int. 43/4, 575-581.

Janža M. & Prestor J. (2002.): Ocena naravne ranjivosti vodonosnika v zaledju izvira Rižane po metodi SINTACS, Geologija, Ljubljana, 45/2, 401-406.

Kapelj S., Loborec J. & Kapelj J. (2012): Assessment of aquifer intrinsic vulnerability by the SINTACS method, Geologia Croatica, Vol. 66, No. 2, 119-128, Zagreb.

Loborec J. (2013): Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice, Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Magdalenic A., Bonacci O., Vazdar T. & Hlevnjak B. (1993): Sliv izvora Gradole u Istri, Zone sanitarne zaštite, Hidrogeološka i hidrološka studija, Hydroexpert, Zagreb.

Magdalenic, A., Vazdar, T., & Hlevnjak, B. (1995). Hydrogeology of the Gradole Spring Drainage Area in Central Istria. Geologia Croatica 48/1, 98-106, Zagreb.

Mali N. & Janža M. (2005): Ocena ranjivosti vodonosnika s SINTACS modelom v GIS okolju, Geologija, 48/1, Ljubljana, 127-140. Ljubljana.

Meaški, H. (2011): Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka „Plitvička jezera“. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 210 str., Zagreb.

Mlinarić M. (2014): Kartiranje prirodne ranjivosti krškog vodonosnika SINTACS metodom na primjeru sliva izvora Gradole. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.

Plan upravljanja vodnim područjima Republike Hrvatske, Narodne novine 82/2013

Plenićar, M., Polšak, A. & Šikić, D. (1969): Osnovna geološka karta 1:100 000, list Trst. Savezni geološki zavod, Beograd

Plenićar, M., Polšak, A. & Šikić, D. (1973): Tumač za list Trst (OGK 1:100 000). Savezni geološki zavod, Beograd

Polšak, A. & Šikić, D. (1969): Osnovna geološka karta 1:100 000, list Rovinj. Savezni geološki zavod, Beograd

Polšak, A. & Šikić, D. (1973): Tumač za list Rovinj (OGK 1:100 000). Savezni geološki zavod, Beograd

Pravilnik o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta, Narodne novine 55/2002

Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (Narodne novine 66/2011, 47/2013)

Rubinić, J. (1995): Plan natapanja na području istarskih slivova - hidrologija. JVP za slivno područje istarskih slivova, Labin

Rudarsko, geološki i naftni fakultet (2003): Istraživanje u cilju zaštite izvorišta vodoopskrbe na području Istarskog poluo- toka, Zagreb

Vidaček, Ž., Bogunović, M., Husnjak, S., Sraka, M., Bensa, A. & Petošić, D. (2004): Tumač hidropedološke karte Republike Hrvatske, M 1:300 000. Zavod za pedologiju, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 33 str.

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L. & Vučetić, V. (2008): Klimatski atlas Hrvatske, 1961. - 1990. : 1971. - 2000. Monografija, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb

SVEUČILIŠTE
U
ZAGREBU



GEOTEHNIČKI
FAKULTET

DAN OTVORENIH VRATA

- A. Popularno znanstvena predavanja
- B. Demonstracijski pokusi
- C. Posterska sekcija
- D. Razgledavanje knjižnice i čitaonice
- E. Radionice za djecu
- F. Nagradna igra „Kolo sreće“
- G. Izložba

TRAVANJ 2017.



**HALLEROVA
ALEJA 7
VARAŽDIN**



Kako nas posjetiti?

Posjetiti nas možete samostalno (individualno).

Grupe je potrebno prethodno najaviti na e-mail ime@jnak@gfv.hr

Na zahtjev se može ponoviti koje od znanstveno-popularnih predavanja ili demonstracijskih pokusa.

A REVIEW ON PERFORMANCE OF ENERGY PILES AND EFFECTS ON SURROUNDING GROUND

PREGLED NAČINA RADA ENERGETSKIH PILOTA I UTJECAJA NA OKOLNO TLO

Renato Zagorščak^{1*}, Hywel Rhys Thomas¹

¹ Geoenvironmental Research Centre (GRC), School of Engineering, Cardiff University, The Queen's Buildings, The Parade, Cardiff, CF24 3AA, United Kingdom

*E-mail of corresponding author: ZagorscakR@cardiff.ac.uk

Abstract: Thermo-active ground structures represent low-energy and sustainable technology which is a clear priority for many countries. Heat transfer between such structures and the surrounding soil is understood to play an important role both in the overall thermal performance of buildings and in the evolution of stresses in structural elements and the surrounding soil. This paper presents an overview of recent research efforts and developments in relation to energy piles. General aspects on the performance of energy piles and their impact on the surrounding ground are presented based on previous field, laboratory and numerical investigations as well as existing case studies. Based on the current knowledge, further research opportunities are identified and highlighted.

Keywords: Energy piles, temperature effects, renewable energy, ground source heat pump

Sažetak: Termički aktivne podzemne konstrukcije predstavljaju nisko-energetsku i održivu tehnologiju čija je primjena prioritet za mnoge države. Izmjena topline između podzemnih konstrukcija i okolnog tla ima važnu ulogu u ukupnoj energetskoj učinkovitosti zgrada te doprinosi naprezanjima u konstruktivnim elementima i okolnom tlu. U ovom je radu prikazan pregled nedavnih terenskih, laboratorijskih i numeričkih znanstvenih istraživanja te izvedenih projekata i dobivenih saznanja na području energetskih pilota gdje su prikazani glavni aspekti energetskih pilota i utjecaji njihova rada na okolno tlo. Na temelju navedenih spoznaja, u ovom se radu navode smjernice za buduća istraživanja u ovom području.

Ključne riječi: Energetski piloti, temperaturni efekti, obnovljiva energija, dizalica toplina

Received: 02.11.2015 / Accepted: 08.04.2016
Published online: 04.07.2016

Pregledni rad / Review paper

1. INTRODUCTION

Climate change is one of the greatest issues the world has been exposed to with a huge environmental, economic and social impact. There are currently more than 160 million buildings across the Europe accounting for over 40% of the total energy usage which is predominantly used for heating, ventilation and air conditioning (Thomas & Rees 2009). Burning fossil fuels is the most common method of generating energy. Due to the fact that fossil fuels are non-renewable and contribute to the greenhouse effect, alternative technologies which promise renewable and sustainable ways of producing energy are required. Moreover, energy-efficient design of buildings is essential for achieving the EU Action Plan for Energy Efficiency which targets 20% energy saving by 2020 (Thomas and Rees 2009).

In the recent years, utilisation of the shallow geothermal energy for heating of buildings is spreading rapidly in Europe and around the world. The emerging technology that is known for using such energy is ground source heat pump (GSHP) system. Two conventional systems can be used for extracting the heat from the ground, i.e. open loop and closed loop systems. The former one uses the groundwater and pumps it directly into the heat pump while the latter uses fluid carrying pipes laid either horizontally or vertically (Kovačević et al. 2012). Due to the high cost of vertical drilling and the need of large land area

for placing horizontal loops, fluid carrying pipes are recently being installed within structural foundation elements known as energy piles (Suryatriyastuti et al. 2012).

Energy piles represent a sustainable geo-energy solution with significant environmental and economic advantages. They combine structural components of the buildings with ground source heat technologies which can be used for heating and cooling applications. In most regions of Europe, seasonal ground temperature is relatively constant below a depth of 10-15 m with values between 10°C and 15°C, representing good conditions for heat extraction and injection (Brandl 2006).

During the past decades, there were many energy pile systems installed all over the world, particularly in Austria, Germany, Switzerland and United Kingdom as well as in Japan and China (Laloui & Di Donna 2011). One of the largest projects in the UK was a building at the Keble College, Oxford which was also the first energy pile structure in the UK, built in 2001 (Suckling & Smith 2002). Since then, a number of installed energy piles in the UK has rapidly been increasing, with almost 4600 piles (cumulative) in 2010 (Laloui & Di Donna 2011). For comparison, by the end of 2004 there were already around 23 000 energy piles installed in Austria and since 2005 more than 6000 energy piles per year (Brandl 2013).

It is obvious that energy piles represent a good solution for heating and cooling of residential, office and commercial buildings since they are a combination of ground structures needed for stability and energy source which results in an additional low costs. Therefore, many universities and research centres have focused both their experimental and numerical work to enhance the understanding of the behaviour of thermal piles under significant temperature changes. Extensive overview of such efforts has been presented in Laloui & Di Donna (2013). Although a lot of information has been gained by researchers and many buildings have been built all over the world up to date, there are still some uncertainties regarding the long term behaviour of energy piles in groups and their influence on the surrounding soil in terms of thermal, hydraulic and mechanical behaviour (THM). Furthermore, due to the fact that implementation of underground geo-structures is currently in its beginnings in some European countries, further research in that area is crucial to have a clear understanding on the performance of such structures and

their impact on the overlaying building and the surrounding soil.

The current paper presents a review on the usage of energy piles and recent research efforts. A focus is put on recent case studies and research efforts in Europe, however with several examples throughout the world. In the first section, a conceptual understanding of general aspects of energy piles and the surrounding soil as well as common recommendations for their implementation and usage are presented. The second part presents and discusses recent results and findings obtained by in situ analyses, small-scale experiments and numerical simulations performed by researchers and engineers in the field. This section is then followed by real case studies conducted around the world. Finally, based on recent research findings, knowledge gaps and further research opportunities are identified and proposed.

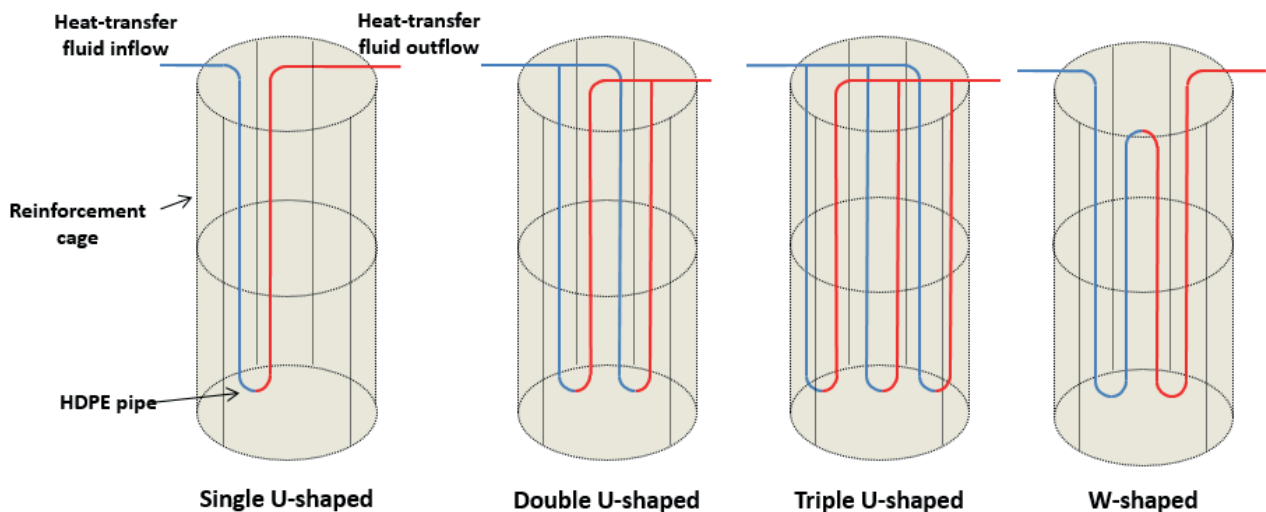


Figure 1. Typical energy pile arrangement with different pipe shapes (modified after Gao et al. 2008a)

2. TECHNOLOGICAL BACKGROUND

Energy piles are a type of closed-loop ground source heat pump system; hence they have higher initial cost but long-term economic benefits. Piles represent a primary unit of the overall heat pump system with the purpose of extracting and injecting heat into the ground through the heat carrying fluid flowing through the pipe system (Fig. 1). System can operate in two different modes, i.e. a single mode with heating/cooling only or both heating and cooling operation (De Moel et al. 2010). Heat pump works similar to the principle of a reverse refrigerator (Brandl 2006). It contains a fluid with low boiling point which turns into vapour in contact with the fluid circulated within energy piles (Brandl 2006). Temperature of the vapour is then increased via compressor. Obtained heat is subsequently used to heat the fluid within the secondary unit, i.e. pipework for heating within the building (De Moel et al. 2010). In the cooling mode, secondary unit is used as the heat source and energy piles transfer heat into the surrounding ground which represents a heat sink. Hence, primary

and secondary units have a reverse role depending on the season (De Moel et al. 2010). A device parameter that reflects the performance of the GSHP system is COP, i.e. Coefficient of Performance (Brandl 2006). This parameter indicates how much heat can be gained for a unit input of electrical energy and its value often varies between 3 and 5 (De Moel et al. 2010).

Precast or cast in situ reinforced concrete is the most common material used for energy piles because of its high thermal storage capacity and heat transfer capabilities (Brandl 2006). Steel foundation pile, because of its low thermal resistance and high thermal conductivity, can also be used (Nagano 2007). Absorber pipes used in energy piles are made of high-density polyethylene (HDPE) and their diameter ranges from 20 mm to 25 mm. Pipes are commonly delivered to working sites on reels and then fixed to the reinforced cage of the energy foundation (Brandl 2006). The most common shapes used in piles are single, double or triple U-shaped pipes and W-shaped pipes (Fig. 1). Due to the increased heat exchange rate resulting from higher fluid flow rates, turbulent flow conditions

should be achieved in pipes (Brandl 2006). Moreover, the effectiveness of the heat transfer might reduce as the temperature difference between the fluid and the pile-soil interface reduces around the pipe circuit (Loveridge 2012). Hence, it is recommended to keep the circuit length between 300 m and 400 m, depending on flow conditions. In case where there are several piles connected into a single pile circuit, a temperature difference between each successive pile will occur, but its magnitude will decrease at higher fluid flow rate (Loveridge 2012).

Pile diameters range from <300 mm up to 1500 mm (Loveridge 2012). Regarding the pile length, it should be larger than the soil upper heterothermal zone which is influenced by seasonal fluctuations (Suryatriyastuti et al. 2012). According to Brandl (2006, 2013), the economical minimum is 6 m because for getting 1 kW of energy, required contact area between the pile-saturated soil and pile-dry sand is 20 m² and 50 m², respectively. Investigations have also proved that spherically shaped heat-exchanging elements can extract more heat energy per unit area than squared ones, hence are more effective (Brandl 2006). Long term behaviour of energy piles is best to represent by the aspect ratio (length divided by the diameter) where piles with shorter length to diameter ratios will reach thermal equilibrium with their surroundings more quickly (Loveridge 2012). However, Nagano (2007) showed that steel piles with effective length of only 4.7 m and diameters from 600 mm to 800 mm, screwed at 4.0 m deep from the ground level proved efficient.

Because of the possibility that negative fluid temperatures might affect the pile behaviour as well as the soil-pile interface and cause freezing, a mixture of glycol and water is commonly used as a heat transfer fluid (Brandl 2006). Both experimental and numerical work suggest that extreme fluid temperatures last for a limited period of time and that would not cause freezing in the pile-soil interface. Moreover, Loveridge (2012) suggested that if concrete's significant role in storing energy rather than just transferring it to the ground is considered, it is possible that fluid temperatures fall below 0°C. Hence, guidance suggested by Brandl (2006) that the fluid temperature should not fall below 2°C is considered conservative for the UK ground conditions (Loveridge et al. 2013). Nevertheless, it is advisable in the absence of calculations that fluid temperatures for large diameter piles (≥600 mm) and small diameter piles are kept above -1°C and 0°C, respectively (Amis et al. 2008; Bourne Webb et al. 2009; Loveridge et al. 2012; Di Donna et al. 2013).

In case where the temperature at the soil-pile interface is negative, thermal conductivity and thermal storage capacity of soil with high water content change, reducing the efficiency of the energy system. Furthermore, significant heave and reduction in the shaft capacity of the pile might occur (Brandl 2006). Hence, it is important to keep the temperatures at the interface above the freezing point. However, temperature gradient that exists across the pile, which can be up to 10°C, depends on the position of the pipes, applied heat flux and properties of the pile (Loveridge et al. 2012). Thermal deformation brings out increasing of mobilised shaft friction at soil-concrete interface (Suryatriyastuti et al. 2012). Furthermore, adhesion and the friction angle on the interface are affected by moisture

transfer in the partially saturated soil caused by temperature changes.

Behaviour of the pile is affected by heat extraction during winter and heat storage during summer because in reality a pile will be able to expand slightly during heating and contract during cooling due to the restraints at the top by the building and at the toe by the underlying soil (Amatya et al. 2012). Hence, there will be a certain amount of additional axial forces developed in the pile (Bourne-Webb et al. 2013). It was observed in several examples that responses are quite complex, but the variation also depends on the type and properties of the soil surrounding the pile (Laloui et al. 2006). Brandl (2006) suggested that the hydration of the fresh pile concrete may also cause thermal strain-induced cracking since temperatures up to 70°C can develop. Hence, pile should have sufficient reinforcement.

Heat transfer mechanism in soil is very complex due to its multiple phase system and involves conduction, convection, vaporisation and condensation processes while radiation, ion exchange and freezing-thawing processes can be neglected (Brandl 2006). Hence, knowledge on ground thermal properties is required for a proper design of energy piles (Loveridge et al. 2013). One of the most important parameters, soil thermal conductivity, is commonly measured using a thermal response test (TRT) or alternatively using laboratory testing (Loveridge et al. 2013).

High-permeability ground and groundwater with high hydraulic gradient are of an advantage if only heating or only cooling is to be performed because if a flow of water is present and sufficiently large, a natural regeneration of soil is achieved. For seasonal operation where heat is being stored in the ground during the cooling mode, reversed conditions are favourable (Brandl 2006; Suryatriyastuti et al. 2012). Moreover, saturated soils conduct heat at a much faster rate while loose dry soils trap air and are less effective for heat transfer (De Moel et al. 2010). Work of Thomas and Rees (2009) has showed the importance of the groundwater table on the energy efficiency of the overlying buildings where with deeper groundwater table heat losses from the building are decreasing. Consequently, this indicated the importance of considering soil moisture content above the groundwater table when estimating soil thermal properties.

It should be noted that the Thermal Pile Standard published by the GSHP Association (GSHPA 2012) provides more detailed information for materials and general specifications of a closed-loop energy pile system which can be used as guidance when considering ground source installation.

3. RESEARCH EFFORTS

Many authors focused their work in both numerical and experimental investigation of energy piles' behaviour. Majority of this work was carried out in terms of thermo-mechanical behaviour of piles and temperature changes in the surrounding soil. Work of Bourne-Webb et al. (2009), Amis et al. (2008) and Amatya et al. (2012) have provided information about an in-situ test performed at the Lambeth College in South London where a pile loading test incorporating temperature cycles was performed.

Thermal-mechanical behaviour of a pile 600 mm in diameter and 23 m in length was observed for 7 weeks, as well as the temperature profiling in the adjacent borehole and anchor piles located 0.5 m and 2.15 m from the pile, respectively. The site investigation showed 4 m of sand and gravel overlying the London clay formation with groundwater table about 3 m below ground level.

Working load of 1200 kN was applied which resulted in an initial pile settlement of 2.4 mm. The temperature range applied was from -6°C to 56°C which represents an extreme case because in the operational range, temperature changes are more likely to vary between -1°C and 30°C. In situ ground temperatures varied from 18°C to 20°C because of the heat energy radiating from the nearby London underground tunnels. A maximum cooling was provided to the test pile throughout the period of 4 weeks with the inlet fluid temperature of -6°C. In the first week, pile cooled by 14°C – 16°C and after 2 weeks reached a state of near equilibrium showing that low injection temperature did not lead to freezing at the pile-soil interface (Fig. 2). During the daily cooling and heating cycle, pile head movement was increased to 4.4 mm and decreased to 2.8 mm, respectively proving the thermally-elastic behaviour of the

pile. Total mobilised shaft resistance developed during the thermo-mechanical loading was within the permissible range of ultimate shaft resistance, with some margin of safety. Hence, it was considered unlikely that the geotechnical capacity of the pile was affected significantly. During the cooling stage, negative shaft friction developed over the lower section while during the heating stage, negative shaft friction developed over the top section as the pile expanded upwards. The lowest temperature recorded was 0.3°C near the toe of the pile, while the maximum temperature change in the adjacent borehole was 9°C, but the temperature reduction appeared in a much slower rate. After the heat pump was switched off and the recovery period begun, temperatures in the pile and the borehole recovered and appeared to be stabilising towards an initial value from the start of the test. Anchor piles located 2.15 m from the test pile showed 4°C reduction during the cooling phase and returned to near ambient conditions during heating. As a result of observations, a descriptive framework for explaining the contribution of pile material and end-restraints to the overall response of thermo-mechanically stressed piles has been presented in Bourne-Webb et al. (2013).

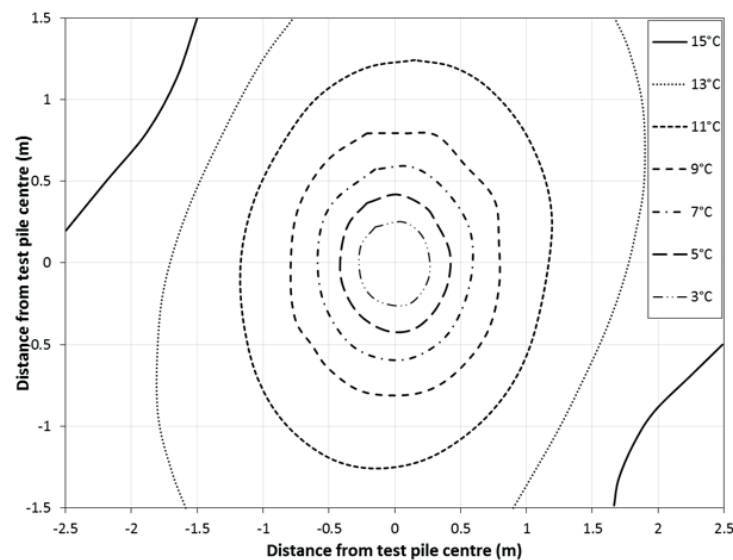


Figure 2. Contours of temperature variation at 12 m depth at the end of cooling (modified after Bourne-Webb et al. 2009)

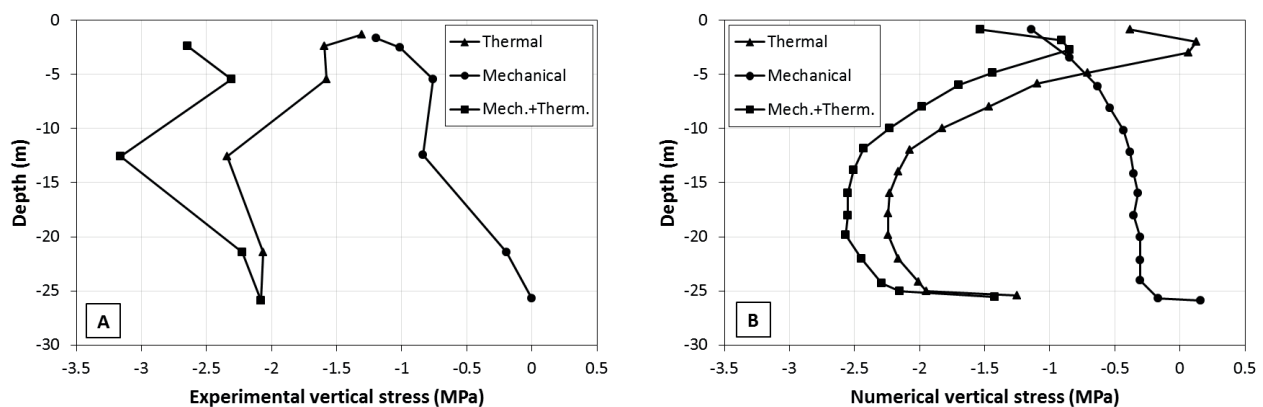


Figure 3. Thermo-mechanical vertical stresses in the pile: (a) experimental results; (b) numerical simulations (modified after Laloui et al. 2006)

In situ test and numerical simulations have been reported by Laloui et al. (2006) for a new four storey building at the Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne, Switzerland. Tested pile was 0.88 m in diameter and 25.8 m in length with a slight increase in pile section with depth. Hence, a radius of 0.5 m was adopted for further numerical analysis. The first 12 m of ground consisted of alluvial soil overlaying sandy gravelly moraine layer with groundwater table very close to the ground surface. Pile was subjected to two types of loading, mechanical and thermal, which were applied separately. Maximum thermal increment applied to the pile was on the order of 21°C. It was shown that the thermal load is larger and rather uniform than the mechanical one and that temperature increment of 1°C resulted in an additional temperature induced vertical force on the order of 100 kN. In addition, a numerical modelling (THM) of soil behaviour was performed through which it was shown that even if the thermal effect propagates more in the soil than does the mechanical load, the induced strains are limited and do not affect the pore water pressure evolution. It was also shown that the developed numerical model was able to reproduce the increase in thermally-induced vertical stresses with depth as well as the decrease in mechanical vertical stresses with depth (Fig. 3).

An experimental observation of the ground temperature change and its impact on the pump efficiency over time in relation to heat extraction has been presented in the work of Wood et al. (2009). System consisted of 21 energy piles 300 mm in diameter and 10 m in length installed within 2 distinct layers, where the first 3 m consisted of an inhomogeneous material made of gravel, cobbles, sand and fine coal overlaying a very soft, red-brown clay with a slight gravel content, for a two-storey residential dwelling. The moisture content varied from 23% at 3.5 m depth to 16% below 5.5 m. The heat load and the inlet water temperature were adjusted throughout the season as would be

typical for an actual heat pump installation. It was observed that the overall change in COP was not significant during the period of a case study, i.e. one heating season, proving the efficiency of the overall system (Fig. 4).

Furthermore, temperature data showed that the effect of heat extraction dominates at a distance of up to 1 m from the pile edge at a depth of 10 m while the seasonal influence is a dominant process at a depth of 2.5 m. For comparison, at a distance of 5 m from the pile edge at a depth of 10 m, no temperature change has been observed. Recorded temperatures before the start of the heating season made at abovementioned depths, i.e. 2.5 m and 10 m were taken as reference temperatures for calculating the change in ground temperature across the heating season.

A full scale experiment with two concrete energy piles 1.5 m in diameter and 20 m long has been reported by Sekine et al. (2007) for the experimental institution built on-site at the University of Tokyo where both heating and cooling were required. Thick layer of fine sand was overlaid by 8 m of clay with groundwater level at 11 m below the ground. Underground temperatures were observed for a whole season at two different measuring points, i.e. point A 0.5 m and point B 2 m from the pile edge. During the heating period, temperatures at 1 m below the ground surface were influenced by the ambient air temperature while temperatures at 10 m and 19 m fell gradually after the start of the heat extraction and stabilized at about 15°C 0.5 m from the pile edge (Fig. 5a). Initial ground temperatures at depths of 10 m and 19 m were 19°C and 17°C, respectively. At the distance of 2 m from the pile edge, temperature reduction appeared at a much slower rate at depths of 10 m and 19 m suggesting that the effect of heat extraction on ground temperature approximately halved in comparison to the measure point located 0.5 m from the pile edge (Fig. 5b).

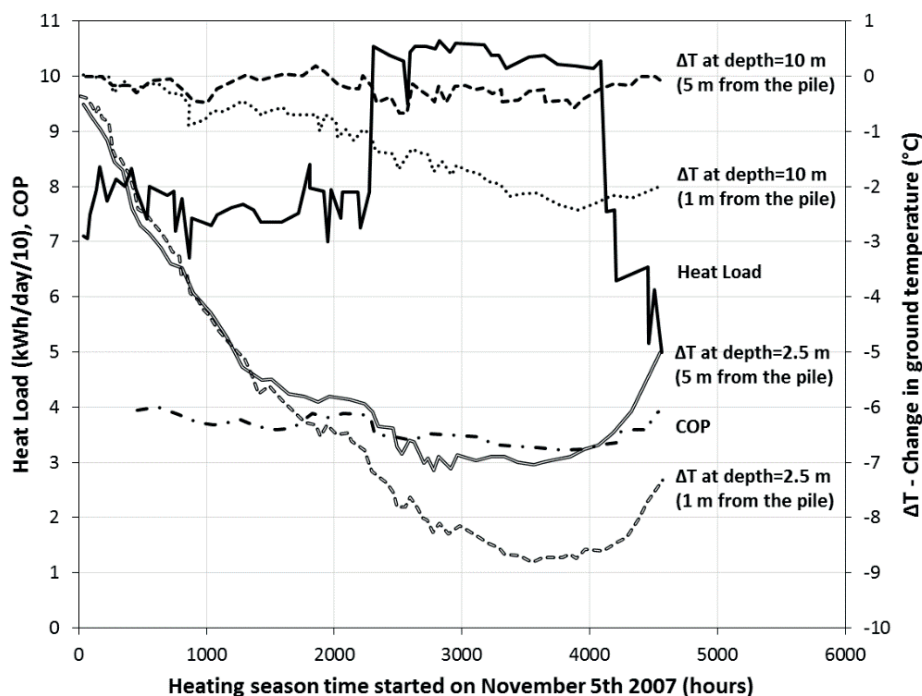


Figure 4. Heat pump monitored parameters and ground temperature 1 m and 5 m from the pile edge at different depths across the heating season (modified after Wood et al. 2009)

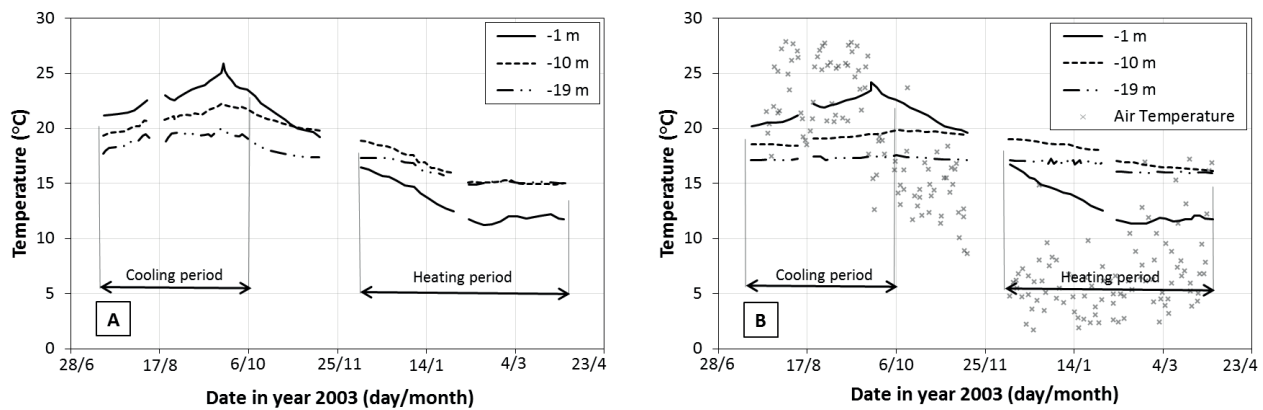


Figure 5. Underground and air temperature variations at different locations from the pile edge, A: 0.5 m; B: 2 m (modified after Sekine et al. 2007)

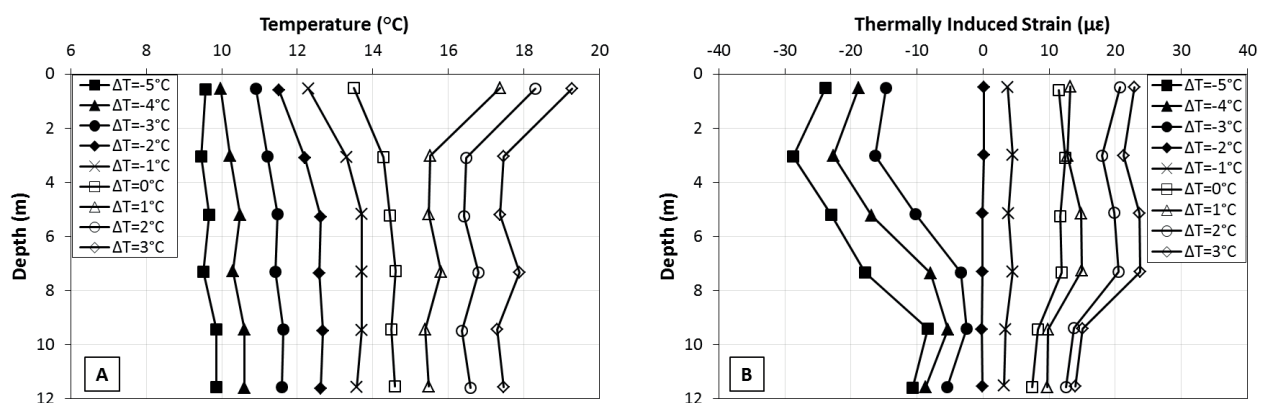


Figure 6. (A) Temperature profiles and (B) thermal axial strain profiles within the energy foundation for different average changes in foundation temperature (modified after Murphy & McCartney 2012)

Due to the high cost of boring in Japan, an examination of construction costs was performed by comparing the conventional borehole system and the energy pile system. It was concluded that the cost of construction per heat extraction and rejection unit of the proposed energy pile system was 75% cheaper than that of a borehole system and was expected to pay for itself within ten years. Furthermore, based on the average COP of 4.89 for this system, authors concluded that it is about 1.7 times more efficient than the more commonly used air-source heat pump (ASHP) system which makes it commercially viable.

Two of 60 drilled shaft foundations for an eight storey building built in Denver, Colorado were converted into energy piles and their behaviour has been discussed in the work of Murphy & McCartney (2012). Both foundations were 1.1 m in diameter but with different lengths, 14.8 m and 13.4 m. Hard sandy claystone bedrock found at 7.6 m of depth was overlaid by a 4.6 m thick layer of sand and gravel and 3 m of fill consisted mostly of clayey sand. Since temperature difference between the inlet and the outlet fluid of 2°C is sufficient for normal operation of heat pump, maximum difference in this case of 10°C had potential for good heat exchange. During the heating operation, temperature of the energy foundation tended to stabilize at 10°C (initial ground temperature was 15°C), indicating steady flow of heat from the ground into the energy pile while for the cooling operation maximum increase of

pile temperature was 3°C from the initial ground temperature. Although shorter foundation had one additional heat exchange loop comparing to the longer one, temperatures of both foundations were similar which indicated that the number of loops may lead to a more uniform temperature distribution within a pile but may not improve heat exchange (Fig. 6a). The shapes of thermal strain profiles indicated that foundations are expanding upwards from the relatively rigid bedrock (Fig. 6b). Hence, conclusion was made that strains and stresses as a result of temperature changes are not expected to lead to structural issues.

A case study has been performed for a district cooling and heating system in Shanghai, China by Gao et al. (2008a, 2008b). A group of 5500 concrete pile foundations, 600 mm in diameter and 25 m in length, was planned to be installed in a land parcel of 100 m x 1000 m which would take about 30% thermal load of district cooling and heating. Besides 5 year numerical simulation of ground temperatures, both numerical and in situ tests were performed to investigate the effect of pile type. Thermal efficiency between single, double, triple U-shaped and W-shaped types was compared under different flow rates. It was concluded that under the same flow rate within the pipes, W-shaped type is the most thermally efficient if the cost is not the definitive index.

Wang et al. (2012) have conducted a laboratory investigation of a coupled thermo-mechanical loading of a steel heat exchanger pile with an outside diameter of 25.4 mm

and 250 mm in length. Silica sand around the pile at initial moisture contents of 0%, 2% and 4% was heated to 40°C and 60°C. The influence of temperature on the moisture content adjacent to the pile was observed. Additionally, mechanical loading/unloading was performed before and after the heating to assess the change in the shaft resistance. It was concluded that the shaft resistance reduction is proportional to thermal loading, i.e. higher shaft resistance reduction resulted from higher thermal loading in a soil sample with the initial moisture content of 2%. Moreover, higher drop in moisture content immediately next to

the pile was observed with higher thermal load (Fig. 7). However, pile shaft resistance recovered when thermal load was removed and the soil sample was cooled to room temperature at 20°C for 24 hours due to moisture migrating back towards the pile. Furthermore, in the soil sample with the initial moisture content of 4%, drop in the moisture content adjacent to the model pile and the shaft resistance reduction were less significant comparing to the soil with the initial moisture content of 2%, while the change in the shaft resistance in dry sand was negligible after applying the thermal load.

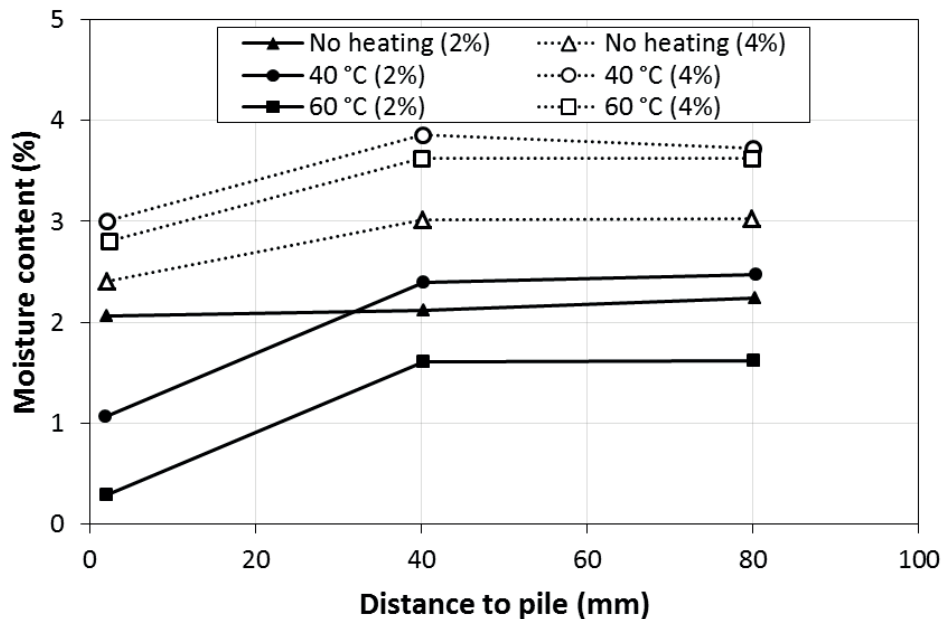


Figure 7. Soil moisture content after 24 hours for soil with initial soil content of 2% and 4% (modified after Wang et al. 2012)

Numerical investigation of the energy pile foundation behaviour, focusing on its long-term response to a seasonally cyclic thermal loading has been performed by Di Donna et al. (2013). The assumption was made that both concrete and soil were porous materials and the whole medium was fully saturated with initial temperature of 11°C. Numerical model consisted of a slab with 7 rows of 15 energy piles each (0.8 m in diameter and 20 m in length) with 7 m spacing between each pile. After the first 5 years, temperature in the most thermally solicited zone (10 m depth) between two piles oscillated among a maximum value of 17°C during summer and 10°C during winter. According to soil's proposed behaviour, its thermal deformation resulted in additional displacements of the foundation which made the foundation moving downward during the cooling period and upward during the heating period. In such case, irreversible displacements were also registered, completely developed during the first 5 years. Since piles were heated and cooled equally together, an additional differential settlement was not induced. Thermally induced pore water pressure was negligible, hence conclusion was that the heating phase occurred in almost drained condition which is likely the case in all energy pile foundations. However, authors used relatively high value of hydraulic conductivity (10^{-8} m/s) which allowed quick pore water

pressure dissipation. In this study, piles had a structural capability to carry both the mechanical and the thermal load applied. It was concluded that soil plastic contraction developed during the first thermal cycles induced a reduction of the confinement cycle after cycle. Consequently, the portion of external load which was initially transmitted through the pile-soil interface reduced during the first 5 years from 70% to 66% and the difference was transmitted through the base of the pile.

A new user-friendly numerical tool, called "Thermopile" has been developed on the basis of previous experimental and numerical analyses (Knellwolf et al. 2011). Receiving conventional soil parameters such as cohesion, internal friction angle of the soil and lateral earth pressure coefficient as an input, it is able to couple the thermal evolution in the soil to the thermo-mechanical behaviour of the soil-heat exchanger pile system. Since it is based on the discretisation of the pile into segments, it allows for the consideration of different soil layers with different properties. Numerical model was validated through the existing data from in situ tests, i.e. Lambeth College and Lausanne Test Pile.

Work of Mimouni & Laloui (2014) gave insight on the impact of temperature variation on the mobilised bearing capacities of energy piles that has been obtained

by numerical modelling using the “Thermopile” software. Change of soil and soil-pile interaction properties with temperature was not taken into account. The mechanics involved in variations of the bearing forces mobilised by piles under the temperature variation was not found to induce failure. Hence, conclusion was made that increasing the factor of safety of geothermal piles does not provide better serviceability, while it can significantly increase costs.

Suryatriyastuti et al. (2012, 2014) have suggested that there is a lack of knowledge concerning the impact of thermal cyclic behaviour of energy piles on the geotechnical performance and that no design code is available yet that takes into account the thermal interactions on the geotechnical capacity. Numerical simulation to analyse the cyclic behaviour of energy piles on the pile-soil interface was performed and conclusion was made that according to the axial fixity at the pile head, degradation of the soil-pile resistance during heating-cooling cycles generates an increase in pile head settlement for the free pile head or decrease in pile head capacity for the restrained head pile. Furthermore, it was found that the groundwater flow has an important role in the heat diffusion process controlling both the ground temperature equilibrium and the soil-pile stress equilibrium.

In order to investigate the impact of an energy pile on ground temperatures, a simple two dimensional heat transfer model of a pile heat exchanger has been set up by Loveridge et al. (2012). Pile was 600 mm in diameter with 4 heat transfer pipes of 25 mm outer diameter symmetrically placed 75 mm from the outside edge of the pile. A sensitivity analysis was performed with different combinations of thermal properties of the concrete and the surrounding ground. Results of the analysis showed that if the thermal conductivity of the concrete is higher than the conductivity of the surrounding ground, temperature difference between the pipes and the pile edge is small. Hence in such case, negative fluid temperatures could lead to the pile-soil interface freezing.

In the work of Ghasemi-Fare and Basu (2013), numerical modelling of the heat transfer through a concrete geothermal pile with an embedded U-shaped circulation tube has been performed. Pile with radius of 300 mm and length of 30 m was considered. It was noticed that the thermal influence zone around the pile extends approximately up to a radius of 3.2 m after 60 days of heat injection from the pile to the ground which can be considered as an extreme scenario. Beyond a depth of 6 pile radii below the pile base, the change in ground temperature was less than 1°C which was considered negligible. Since with the decrease in soil water content, value of the soil thermal conductivity reduces, heat transfer performance was investigated in the presence of a 5 m desiccated zone from the ground surface. It was noticed that the thermal influence zone is smaller within this layer, but increase of the ground temperature adjacent to the pile is greater due to lower thermal conductivity of unsaturated soil.

Moritz and Gabrielsson (2001) have performed a field experiment for heat storage in clay for two stores with groundwater 2 m below the ground surface. Maximum temperatures of 70°C and 90°C were applied to the first and the second store, respectively. It was observed after 7.5 years that the settlement in the first store was 70 mm while

in the second store a settlement of 140 mm was recorded. Furthermore, an excess pore water pressure developed during the heating phase and negative pore water pressure developed during the subsequent cooling.

Thermally induced volume changes of saturated fine-grained soils have been experimentally investigated by numerous researchers and an extensive review has been presented in Abuel-Naga et al. (2015). Excess pore pressure during heating is induced by 7-10 times higher thermal expansion coefficient of water with respect to the solid particles (Laloui and Di Donna 2013). Volume variations caused by heating clayey soils in drained conditions depend on the consolidation state of the soil. For normally or lightly over-consolidated clayey soils, heating usually results in contraction while for highly over-consolidated clays elastic expansion is typical (Abuel-Naga et al. 2007). Furthermore, with an increase in temperature, yield limit shrinks and the reduction of the pre-consolidation pressure occurs (Laloui & Di Donna 2011). In case where the soil is highly permeable and the temperature is increased slowly enough, pore pressures have time to dissipate because the heating phase approaches drained conditions (Di Donna et al. 2013). Conversely, an increase in the pore water pressure in low permeable soils causes a decrease in effective stress of the soil (Brandl 2006). In saturated low permeable and chemically active porous media, osmosis phenomena are among key processes identified to control the water flow and deformation behaviour. In particular, flow of water driven by a temperature gradient, i.e. thermo-osmosis was found to contribute to pressure distribution and flow in such media (e.g. Trémosa et al. 2010). Zagorščak et al. (forthcoming 2016) have conducted an investigation on the effects of thermo-osmosis on hydraulic behaviour of saturated soils. Sensitivity analysis was performed using different values of thermo-osmotic conductivity and it was concluded that the effect of thermo-osmosis is considerable for chemically active soils with thermo-osmotic conductivity values larger than $10^{-12} \text{ m}^2\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$.

It was showed that temperature changes in the partially saturated soil cause moisture movement towards the colder region which changes the stress-strain-strength behaviour of the soil and the soil-pile interface (e.g. Wang et al 2012). Consequently, soil thermal properties are affected (De Moel et al. 2010; Ghasemi-Fare and Basu 2013). Such processes gradually cause shrinkage in the warm zone and expansion in the cold one in unsaturated fine-grained sensitive soils (Brandl 2006). From geotechnical point of view, heating of foundations may also have an important advantage in improvement of soil characteristics which might result in a reduction of foundation costs (Laloui et al. 2006). Positive effect on resilience of clayey soils under cyclic loading can be achieved by thermal pre-treatment which can result in a higher resistance of the buildings against earthquakes (Laloui et al. 2006).

4. EXAMPLES OF ENERGY PILE INSTALLATIONS

Many examples of successful energy pile installations exist around the world. By the end of 2006 in Austria, there were nearly 300 buildings fitted with energy piles or energy diaphragm walls (Brandl 2006). In Switzerland,

more than 40 projects have been built on energy pile foundations and probably the most famous one is the Dock Midfield terminal at Zürich airport (Laloui & Di Donna 2011). Germany and UK are countries in which several buildings have been equipped with energy piles (Laloui & Di Donna 2011). In the UK, energy pile systems are mainly constructed in London, but the first one ever built in the UK was at the Keble College, Oxford. According to Laloui & Di Donna (2011) some installations have been made in Japan, Canada, Scotland, Liechtenstein, Italy and Netherlands.

4.1. Keble College, Oxford, UK

In the work of Suckling & Smith (2002), an example of the first energy pile installation in the UK built in 2001 has been presented. A six storey structure included a basement up to 7 m below the existing ground level. Soil consisted of 4 different layers with a groundwater table at about 5 m below the surface. Mean ground temperature below 10 m depth was around 13°C. Very stiff to hard Oxford clay at a depth of 7.5 m was overlaid by a 3.5 m thick Thames river deposits above which mixed layers of firm alluvial clay and made ground were found. It was planned that the heat pump increases the temperature of the fluid from 13°C to between 25°C and 35°C. The retaining wall was executed as a hard/soft secant wall comprising in total of 223 piles of different type. Length and diameter of the piles ranged from 9-15 m and 600-750 mm, respectively. Furthermore, 61 bearing piles with 450 mm diameter and 12 m in length were added to accommodate structural loads. Plastic pipes for fluid flow were attached to the reinforcement of the foundation elements prior to concreting. No pile diameter or length was increased to accommodate geothermal requirements above that designed for the required structural or geotechnical applied loads.

4.2. Sapporo City University, Japan

The world's first energy pile system which utilized steel foundation piles as heat exchangers for the new building at Sapporo City University built in 2005 has been presented in the work of Nagano (2007). System consisted of 51 energy piles screwed into the ground predominantly consisted of gravel and sand at 4 m depth from the ground level. Diameter of the piles varied from 600 mm to 800 mm, while their average length was 6.2 m. Due to the usage of indirect closed circulating system (using U-tubes soused in water) with 2 sets of U-tubes inserted into each pile, effective length of each pile resulted in 4.7 m. According to calculations based on the condition that the pipe temperature did not fall below -2°C, system could supply daily base heating load of 40 kW. However, heating output of 50 kW was required so three additional boreholes were planned to be drilled at a reasonable length of 75 m to satisfy the heat output.

A novel GSHP designing and performance prediction tool has been also developed based on the work of author's group, able to treat the random layout of ground heat exchangers with high speed calculation algorithm. Tool includes database of heat pump performance curves according to both outlet temperature of the primary side,

i.e. energy piles and inlet temperature of the secondary side, energy prices and specific CO₂ emissions. As a result, hourly energy consumption and energy cost can be obtained. Moreover, life cycle energy and life cycle CO₂ emissions can be evaluated.

Prediction of performance showed that when the system adopted a constant-speed pump in order to satisfy maximum heat output, Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) was 2.7. However, during winter and summer the maximum SCOP can reach 4.4 and 5.7, respectively suggesting that a variable speed pump depending on the heat loads can be effective to improve SCOP. Annual operating cost and annual CO₂ emissions of the GSHP system were compared with those of gas systems; a gas boiler providing heating only and a system providing both heating and cooling. Operating cost for the GSHP system represented half the cost of a gas boiler providing heating only and 42% of the one with cooling and heating system. Annual CO₂ emission of GSHP was 12 tons which is 3.8 tons and 7.4 tons less compared with a gas boiler providing heating only and system providing both heating and cooling, respectively.

4.3. Dock midfield of Zürich airport, Switzerland

System design and construction of the New Terminal E at Zürich Airport has been presented in Laloui & Di Donna (2013). New terminal was built on 440 foundation piles, of which 300 were equipped with five U-pipes fixed on the reinforcement. Piles were approximately 30 m in length with a diameter ranging from 0.9-1.5 m fully passing through soft lake deposits and standing on a moraine layer. It was expected that energy piles meet around 65% and 70% of heating and cooling demands, respectively. Terminal has been in use since 2004 and the overall ratio of thermal energy obtained by the system and the total electric energy used to run was set as 5.1. Hence, it has proven to be economically more profitable than a conventional pile system.

4.4. Projects in Austria

Few research projects performed in Austria have been presented in the work of Brandl (2006). A rehabilitation centre comprising of seven floors, two of them beneath the ground surface, was constructed on a system of 175 piles, of which 143 were fitted with heat exchangers. Diameter of the piles was 1.2 m while the pile length varied between 9-18 m depending on the static requirements and ground properties. Ground consisted mostly of silty sand and clayey to sandy silt with groundwater at 4-5 m below the surface. In the first winter period, minimum pile temperature was close to 2°C. It was shown that operational fluid temperatures between -2°C to -3°C (temporarily - 5°C) caused the formation of ice lenses in the ground and a heave of 15 cm of the surface behind the piles. However, this was partly attributed to low air temperatures. The system has been in use since the autumn 1997 without any problem. Significant influence of the groundwater flow as well as the influence of air temperature on the system was clearly visible where strong groundwater flow enhanced pile temperature recovery (Fig. 8).

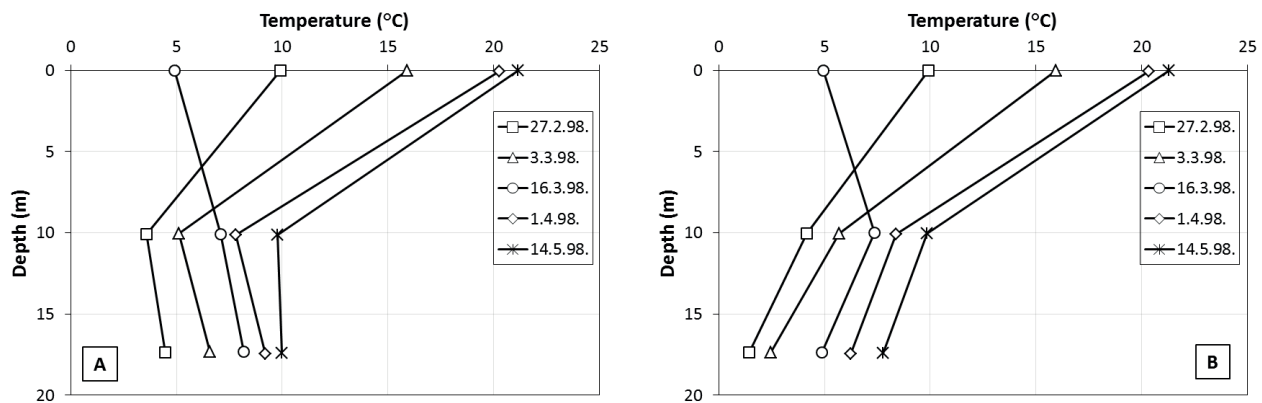


Figure 8. Temperature evolution (measured in the centre of the pile) along two different piles
A) Strong groundwater flow (6 l/s), B) Poor groundwater flow (0.6 l/s) (modified after Brandl 2006)

A deep foundation comprised of 320 cast in situ concrete piles was built for a multipurpose hall with a capacity of 8000 people. Piles were 18 m long and 0.5 m in diameter totally containing about 65 km of absorber pipes. An annual saving of 85 000 m³ of natural gas, equivalent to 73 tons of CO₂ was achieved by this cooling and heating system. Nearby, a spa hotel with geothermal cooling and heating was also built. In a foundation of 357 piles, 30 m long around 69 km of plastic pipes were installed. Energy extracted from the ground during the winter corresponds to the energy demand of about 160 modern one-family houses.

Arts Centre with a foundation comprised of energy piles and diaphragm walls was built. The diaphragm wall thickness varied between 0.5 m and 1.2 m while the diameter of the piles was 1.2 m. Depth of a diaphragm wall was 28 m while the pile length varied between 17 m and 25 m. Soil was mostly consisted from loose sand and weak clay with a groundwater level about 1 m below the surface. Building was heated during the winter and cooled during the summer through the energy pile system which resulted in both environmental and economic benefits. Calculations showed that the saving in investment costs was €1.32 million while the annual savings in energy and operation costs were €22,700 in comparison with a conventional air-conditioning system.

Paper-processing plant was built on a piled raft foundation consisting of 570 driven reinforced concrete piles (0.4 m x 0.4 m). Length of each pile was 24 m with only the top 14 m used to accommodate absorber pipes. Building heating demand was achieved through combined usage of the waste heat from machines and energy piles while the cooling demand was predominantly achieved through the usage of energy piles. System has been running since autumn 1995 without problems.

The first thermo-active traffic tunnel (“energy tunnel”) was also built in Austria using two different methods. The first section was performed using the cut and cover method, consisting of 59 energy piles 1.2 m in diameter and 17.1 m in length, while the other one was the NATM section. The cut and cover section was connected with the adjacent school in order to provide heating to the building. Predictions were made that annual savings in operation will be €10,000, compared with the old natural gas system, and a decrease in annual CO₂ emissions of 30 tons will be achieved. Calculations showed that down to -5°C of the

outdoor temperature, school building can be fully heated with the GSHP system.

Besides for residential and commercial heating and cooling purposes, energy geo-structures are used in various environments, e.g. cooling and heating of metro stations, bridge decks, road pavements and parking places, airport runways, etc. Brandl (2006) and Laloui & Di Donna (2013) have given a more detailed overview on the usage of ground energy.

5. FUTURE PROSPECTS AND RESEARCH CHALLENGES

During the past 30 years, the number of installed energy pile systems has been constantly increasing. Although their geotechnical dimensioning and designing was based on experience and empirical considerations, there has not been any structural or geotechnical collapses up to date. However, common practice was to adopt increased safety factors in comparison to conventional piles which resulted in additional cost. It was proved in several examples, both numerically and experimentally, that thermal stresses in the pile within normal and expected temperature boundary conditions are significant and if this is considered in the design, potential hazards should be avoided. However, stresses and strains were measured only in the axial direction while it can be expected that the radial behaviour of the concrete and the soil mass could have an impact on the pile-soil interaction. Furthermore, large thermal stresses measured in situ for isolated thermal piles that were part of a conventional pile system may be unrepresentative of situations where a system of energy piles is heated or cooled at the same time. Most numerical analyses were based on regular arrangement of energy piles, developed from borehole heat exchangers which are commonly used in regular patterns. Since in reality this is rarely the case, numerical modelling including irregular position of piles with different lengths would provide further understanding of their influence on the overlying structure and the surrounding soil. Furthermore, investigating the effect of such system in a dense urban environment where the surrounding soil is also being used for heat extraction by other dwellings would be beneficial. In addition to that, as recommended by the GSHPA Thermal Pile Standard (GSHPA 2012), case where energy piles are

connected into a single pile circuit across different soil layers should also need to be considered in the future work because variable temperature field developed in the ground could cause differential settlements of the system and potentially endanger the structure stability.

An extensive experimental work in relation to thermally induced volume changes in cohesive soils has been conducted showing that normally consolidated and lightly over-consolidated soils exhibit significant consolidation over time. In addition, it has been shown that pore water pressure in low permeable soils increases reducing the effective stress near the heat source. Influence of such behaviour on end bearing and shaft resistance of pile groups has not yet been sufficiently understood and adopted in daily energy pile designs. Majority of numerical models consider soil as a single bulk phase ignoring the thermodynamic pore water density, viscosity and pressure variation with temperature. While it has been experimentally shown that heating of foundations cause the moisture migration away from the heat source reducing the shaft resistance even in non-cohesive soils such as sands, considering soil as fully saturated and neglecting the phase transition in unsaturated soils in the current models limits their application in different conditions and climates. Induced volume changes in soil are of high importance in cases where the soil around energy piles is being used as heat storage, as it has been experimentally shown that heat injection over several years can cause significant settlement of the soil.

Additionally, moisture migration is expected to alter heat transfer properties of the partially saturated bulk soil, i.e. thermal conductivity, heat capacity and thermal diffusivity. One of the most important thermal properties of the soil, i.e. thermal conductivity can be measured using field or laboratory test. While field tests, such as TRT are expensive and time consuming, laboratory test are simple to conduct but the interpretation of results should be performed with great care due to the soil disturbance and idealized boundary conditions used in comparison to the real ground conditions. Hence, interpreting such properties over a range of time periods taking into account cyclic thermal behaviour of energy piles in multiphase and multicomponent soil materials and comparing to the initial design values, would enhance the design of energy pile systems. In that case, more realistic linear rates of heat injection/extraction would be able to be determined.

Several in situ tests revealed the importance of groundwater flow in the natural thermal recharge of the ground, while numerical studies have not taken such phenomena into account. While convection is of less importance in low-permeable soils, i.e. clays, the significance of investigating the groundwater flow is obvious and great in semi- and highly-permeable soils. Such studies are of importance because ground temperature can gradually increase or decrease during the years if the amount of heat extracted during the winter and heat injected during the summer is imbalanced which can result in lowering the efficiency of the heat pump. In such cases, additional heating/cooling systems would have to be added increasing the cost of the overall energy system. In order to analyse the long-term performance of the entire system, predictions regarding the soil recovery process should be performed especially in cases where heating demand is

predominant. Furthermore, due to unpredictable weather conditions that might arise as a result of climate change leading to modified groundwater recharge and changing the aquatic environment, taking groundwater flow and change in groundwater table into further analyses is of importance for long-term prediction of energy piles' performance.

According to several researchers and the current standard (GSHPA 2012), possible soil freezing which causes expansion of the water phase and a subsequent permanent soil deformation that may have a severe effect on the shaft resistance and end bearing capacity should be avoided. Such condition can be satisfied by keeping the fluid temperatures above 0°C, while in reality this can easily be violated simply by leaving the heating system operating beyond its design constraint. However, previous research findings showed contradictory results. While some in situ tests showed that negative fluid temperatures did not lead to freezing in the soil-pile interface, a combination of both negative air temperatures and fluid temperatures within piles caused significant heave next to piles in the other case study. Therefore, if such constraint is improved by taking into account concrete's significant role in storing the energy, it would allow the range of temperatures in piles to be extended and more heat to be derived from the energy pile system. On the other hand, in cases where freezing might occur due to the unexpected failure of the heat pump system or change in climate conditions, the influence of freezing and thawing cycles on volume change and subsequent changes in shear behaviour between the soil and the pile concrete should be further investigated. Such findings would also be highly useful in advanced geotechnical constructions conducted in areas with colder climate, i.e. permafrost areas.

In recently conducted numerical simulations, presented models have been simplified taking heat conduction as the only way of heat transfer and have been conducted focusing mostly on heat propagation around the heat source with assumption that material properties of the ground do not change with temperature. Such simplifications are introduced mostly because numerical tools for analysis of coupled processes are in general mesh-dependent, oscillatory and computationally resource demanding. Hence, such models exhibit limitations and cannot be fully used for general structural conditions and climates in daily engineering practice. Because past in situ tests were performed over a short time period, i.e. mostly one heating/cooling season, 3-dimensional numerical modelling describing transient thermo-hydro-mechanical behaviour of energy piles embedded in a soil mass is essential for providing insights into energy piles' behaviour over a long time period. Hence, further effort should be focused in developing comprehensive but numerically efficient tools that will be designed to run on desktop machines that could be utilised in engineering practice. However, full scale field experiments focusing on the long-term thermo-mechanical soil-pile interaction and laboratory experiments through which material parameters and thermo-hydro-mechanical constitutive relationships would be derived are essential for development and validation of such numerical models that would be capable of addressing potential failure mechanisms. In addition, such models could be

then utilised for establishing standards and norms as well as enhancing existing guidelines.

6. CONCLUSION

In the past few decades, energy piles have proved to be innovative and environmentally friendly structural elements that function as heat exchangers providing energy to the overlying structure. Different examples and existing research studies are presented in this paper, providing general information obtained in the previous work. Although this technology has been recently applied in various countries, there are still important knowledge gaps on the consequences of the application of such technology because of the potential risks that might arise due to unforeseen induced cyclic thermal stresses making construction companies reluctant to apply energy piles in daily practice. Potential issues and knowledge gaps related to thermal, hydraulic and mechanical behaviour of soil and the soil-pile interaction are pointed out which, if further investigated, could help to better understand the long term behaviour of such systems.

7. ACKNOWLEDGMENTS

The work described in this paper has been carried out as a part of the GRC's (Geoenvironmental Research Centre) Seren Project, which is funded by the Welsh European Funding Office (WEFO). The financial support is gratefully acknowledged. The authors also wish to thank the financial support from School of Engineering, Cardiff University. Dr. Majid Sedighi is thankfully acknowledged for the support at the initial stage of creating this paper.

8. REFERENCES

- Abuel-Naga, H., Bergado, D.T. and Bouazza, A. (2007) Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay. *Engineering Geology*, 89, 144-154.
- Abuel-Naga, H., Raouf, M.I.N., Raouf, A.M.I. and Nasser, A.G. (2015) Energy piles: current state of knowledge and design challenges. *Environmental Geotechnics*, 2 (4), 195-210.
- Amatya, B.L., Soga, K., Bourne-Webb, P.J., Amis T. and Laloui, L. (2012) Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62 (6), 503-519.
- Amis, T., Bourne-Webb, P.J., Davidson, C., Amatya, B., and Soga, K. (2008) The effects of heating and cooling energy piles under working load at Lambeth College, UK. DFI Conference New York, 2008.
- Bourne-Webb, P.J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C. and Payne, P. (2009) Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique*, 59(3), 237-248.
- Bourne-Webb, P.J., Amatya, B. and Soga, K. (2013) A framework for understanding energy pile behaviour. *Geotechnical Engineering*, 166 (GE2), 170-177.
- Brandl, H. (2006) Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.
- Brandl, H. (2013) Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling. *Procedia Engineering*, 57, 9-18.
- De Moel, M., Bach, P.M., Bouazza, A., Singh, R.M. and Sun, J.O. (2010) Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2683-2696.
- Di Donna, A., Dupray, F. and Laloui, L. (2013) Numerical study of the heating-cooling effects on the geotechnical behaviour of energy piles. Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics – Manassero et al (Eds). 2013 Taylor & Francis Group, London, 475-482.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K.S. and Yang, J. (2008a) Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 28, 2295-2304.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K.S. and Yang, J. (2008b) Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application. *Applied Energy*, 85, 901-910.
- Ghasemi-Fare, O. and Basu, P. (2013) A practical Heat Transfer Model for Geothermal Pile. *Energy and Buildings*, 66, 470-479.
- GSHPA (2012) Thermal pile design, installation and materials standard, Ground Source Heat Pump Association, Milton Keynes, October 2012.
- Knellwolf, C., Peron, H. and Laloui, L. (2011) Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), 890-902.
- Kovačević, M.S., Bačić, M. and Arapov, I. (2012) Prospects of underground engineering in the use of shallow energy. *Gradvinar*, 64 (12), 1019-1028.
- Laloui, L., Nuth, M. and Vulliet, L. (2006) Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 30, 763-781.
- Laloui, L. and Di Donna, A. (2011) Understanding the behaviour of energy geo-structures. *Proceedings of ICE, Civil Engineering*, 164, 184-191.
- Laloui, L. and Di Donna, A. (2013) Energy Geostructures, Innovation in Underground Engineering. ISTE Ltd, London.
- Loveridge, F. (2012) The Thermal Performance of Foundation Piles used as Heat Exchangers in Ground Energy Systems. PhD Thesis, University of Southampton, England, UK.

Loveridge F., Amis, T. and Powrie, W. (2012) Energy Pile Performance and Preventing Ground Freezing. In: 2012 International Conference on Geomechanics and Engineering (ICGE '12), Seoul, KR.

Loveridge, F., Powrie, W. and Smith, P. (2013) A review of the design and construction aspects for bored thermal piles. *Ground Engineering*, March 2013, 28-31.

Mimouni, T. and Laloui, L. (2014) Towards a secure basis for the design of geothermal piles. *Acta Geotechnica*, 9 (3), 355-366.

Moritz, L. and Gabrielsson, A. (2001) Temperature effect on the properties of clay. *Geotechnical special publication*, 304-314.

Murphy, K.D. and McCartney, J.S. (2012) Behaviour of Full-Scale Energy Foundations in Denver, Colorado. *GeoChallenges*, 217-229.

Nagano, K. (2007) Energy pile system in new building of Sapporo City University. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*, 234, 245-253.

Sekine, K., Ooka, R., Yokoi, M., Shiba, Y. and Hwang SH (2007) Development of a ground source heat pump system with ground heat exchanger utilizing the cast-in-place concrete pile foundations of buildings. *ASHRAE Trans.*, 558-566.

Suckling, T.P. and Smith, P.E.H. (2002) Environmentally friendly geothermal piles at Keble College, Oxford, UK. In: *International Conference on piling and deep foundations*, 445-452.

Suryatriyastuti, M.E., Mroueh, H. and Burlon, S. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3344-3354.

Suryatriyastuti, M.E., Mroueh, H. and Burlon, S. (2014) A load transfer approach for studying the cyclic behaviour of thermo-active piles. *Computers and Geotechnics*, 55, 378-391.

Thomas, H.R. and Rees, S.W. (2009) Measured and simulated heat transfer to foundation soils. *Géotechnique*, 59 (4), 365-375.

Trêmosa, J., Gonçalves, J., Matray, J.M. and Violette, S. (2010) Estimating thermo-osmotic coefficients in clay rocks: II. In situ experimental approach. *Journal of Colloid and Interface Science*, 342, 175-184.

Wang, B., Bouazza, A., Barry-Macaulay, D., Singh, M., Webster, M., Haberfield, C., Chapman, G. and Baycan S. (2012) Field and Laboratory Investigation of a Heat Exchanger Pile. *GeoCongress 2012*, 4396-4405.

Wood, C.J., Liu, H. and Riffat, S.B. (2009) Use of energy piles in a residential building, and effects on ground temperature and heat pump efficiency. *Géotechnique*, 59 (3), 287-290.

Zagorščak, R., Sedighi, M. and Thomas, H.R. (forthcoming 2016) Effects of thermo-osmosis on hydraulic behaviour of saturated clays. *International Journal of Geomechanics*.



UDRUGA DIPLOMANATA GEOTEHNIČKOG FAKULTETA SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

Udruga je osnovana 2012. godine na inicijativu nekolicine profesora i bivših studenata Geotehničkog fakulteta. Osnovna ideja ove Udruge je okupiti diplomante Geotehničkog fakulteta te organizacijom susreta potaknuti njihovu daljnju međusobnu suradnju, razmjenu iskustava te druženje i nakon završetka studija.

Neki od ciljeva Udruge su promicanje ugleda Sveučilišta u Zagrebu i Geotehničkog fakulteta, izgradnja i jačanje veza i suradnje između diplomanata i Geotehničkog fakulteta, razmjenjivanje strukovnih iskustava među članovima Udruge, pružanje iskustvenih informacija potencijalnim studentima u vezi sa studijem na Fakultetu te izgradnja veza i suradnje Geotehničkog fakulteta i sličnih obrazovnih, razvojnih i istraživačkih institucija u Republici Hrvatskoj i u svijetu, kao i uspostava i razvijanje suradnje sa sličnim udrugama.

Redovitim članom Udruge može postati svaka osoba koja je diplomirala na Geotehničkom fakultetu na bilo kojem stupnju studija, dok podupirućim članom (članom prijateljem) može postati svaka osoba koja je završila srodni ili odgovarajući fakultet u Republici Hrvatskoj ili inozemstvu ili pravna osoba.

Više informacija o Udruzi kao i načinu učlanjenja možete pronaći na internetskim stranicama Geotehničkog fakulteta
<http://www.gfv.unizg.hr/hr/alumni.html>

MOGUĆNOST UPORABE SAMONIKLIH VODENIH I MOČVARNIH BILJNIH VRSTA U BILJNIM UREĐAJIMA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

POTENTIAL FOR USING WILD AQUATIC AND MARSHLAND PLANT SPECIES IN CONSTRUCTED WETLANDS FOR WASTEWATER TREATMENT

Zvezdana Stančić ^{1*}, Lucija Baić ¹, Valentina Kraš ¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

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

Sažetak: Biljni uređaji omogućavaju ekološki i ekonomski isplativ način pročišćavanja manjih količina otpadnih voda. U Republici Hrvatskoj postoji nekoliko biljnih uređaja, ali i mogućnosti za izgradnju novih. Rade na principu prirodnih eutrofnih vodenih ekosustava. Organske i hranjive tvari glavna su onečišćivala u većini otpadnih voda. Mikroorganizmi i biljke preuzimaju te tvari i proizvode biomasu te na taj način sudjeluju u pročišćavanju vode. Od biljnih vrsta, u Hrvatskoj najčešće se koristi trska, a rijetko neke druge vrste. Suprotno tome, hrvatska flora i vegetacija poznate su po svojoj bioraznolikosti. Stoga je cilj ovog rada bio ispitati mogućnosti korištenja većeg broja samoniklih biljnih vrsta u biljnim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda. Odabrano je 80 vrsta koje rastu na močvarnim i vodenim staništima s različitim ekološkim uvjetima. Biljne vrste su analizirane s obzirom na pripadnost skupini vodenih ili močvarnih vrsta, visinu biljaka, dubinu korijena te prilagodbe na ekološke čimbenike okoliša koje su izražene pomoću ekoloških indeksa (za svjetlost, temperaturu, kontinentalnost, vlagu, reakciju supstrata, hranjive tvari, salinitet). Rezultati su pokazali da biljne vrste imaju vrlo različita svojstva te se mogu koristiti u biljnim uređajima s vrlo različitim i specifičnim tehnološkim zahtjevima. Na primjer, za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda koje sadrže velike količine organskih i hranjivih tvari, koje su približno neutralne reakcije, u uvjetima kontinentalne klime, pogodne su biljke kao što su trska (*Phragmites australis* (Cav.) Steud.); širokolisni rogoz (*Typha latifolia* L.), jezerski oblič (*Scirpus lacustris* L.), velika pirevina (*Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.), trstasti blještac (*Phalaris arundinacea* L.), razgranjeni ježinac (*Sparganium erectum* L.), žuta perunika (*Iris pseudacorus* L.), klasasti krocanj (*Myriophyllum spicatum* L.), mala vodena leća (*Lemna minor* L.), podvodna vodena leća (*Lemna trisulca* L.) i druge. U uređajima se može koristiti jedna i više vrsta. Moguće prednosti korištenja većeg broja biljnih vrsta su poboljšanje učinkovitosti pročišćavanja otpadnih voda, predstavljaju zamjenska vodena i močvarna staništa za biljne i životinjske vrste te pridonose estetskoj vrijednosti krajobraza.

Glavne riječi: Makrofiti, pročišćavanje vode, Hrvatska.

Abstract: Constructed wetlands provide an ecological and inexpensive method of wastewater treatment. In the Republic of Croatia, there are several constructed wetlands, and also the opportunity to build new ones. They work on the principle of natural eutrophic water ecosystems. Organic matter and nutrients are the main pollutants in most wastewater. Microorganisms and plants incorporate such substances into their cells and produce biomass, in this way purifying the water. Among the plant species, in Croatia, the most commonly used is reed, and rarely anything else. In contrast, Croatian flora and vegetation are known for their high biodiversity. Therefore, the aim of this study was to investigate the possibility of using a larger number of wild aquatic and marshland plant species in constructed wetlands for wastewater treatment. Eighty species were selected, all native to aquatic and marshland habitats with different environmental conditions. The plant species were analysed with respect to division into aquatic and marshland species, plant height, depth of roots, and adaptation to environmental conditions using ecological indices (for light, temperature, continentality, moisture, soil reaction, nutrients and salinity). The results showed that the plant species have very different properties and can be used in constructed wetlands with very different and specific technological requirements. For instance, for the treatment of municipal and domestic wastewater which contains large amounts of nutrients and is of approximately neutral reaction, in the conditions of a continental climate, suitable plants include reed (*Phragmites australis* (Cav.) Steud.); broad-leaved cattail (*Typha latifolia* L.), lakeshore bulrush (*Scirpus lacustris* L.), great manna grass (*Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.), reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.), simplestem bur-reed (*Sparganium erectum* L.), yellow flag (*Iris pseudacorus* L.), spiked water-milfoil (*Myriophyllum spicatum* L.), common duckweed (*Lemna minor* L.), star duckweed (*Lemna trisulca* L.) and others. In constructed wetlands, one or more species can be used. The possible advantages of using a larger number of plant species are: to improve the efficiency of wastewater treatment, for constructed wetlands to serve as replacement aquatic and marshland habitats for plant and animal species, and to contribute to the aesthetic value of the landscape.

Keywords: Macrophytes, water purification, Croatia.

Received: 31.03.2016 / Accepted: 27.05.2016

Published online: 04.07.2016

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Biljni uređaji su projektirani i izvedeni prema načelima prirodnih močvarnih ekosustava. Sastoje se od vodenog medija, supstrata, biljaka i mikroorganizama. Koriste se radi pročišćavanja otpadnih voda. Mogu biti izgrađeni na različite načine, kao površinski (otpadna voda vidljiva na površini uređaja), podpovršinski uređaji (otpadna voda teče kroz supstrat) s horizontalnim protokom otpadne vode, podpovršinski s vertikalnim protokom otpadne vode te kombinacije različitih tipova (U.S. EPA 1988, 2000; Ružinski & Anić Vučinić 2010; Vymazal 2010, Malus & Vouk 2012). U biljnim uređajima otpadna voda obrađuje se fizikalnim, biološkim i kemijskim procesima. Ti procesi uključuju taloženje i filtraciju suspendiranih tvari, razgradnju organskih tvari mikroorganizmima, asimilaciju hranjivih tvari biljkama i mikroorganizmima te razne kemijske reakcije (U.S. EPA 1988; Ružinski & Anić Vučinić 2010). Biljni uređaji mogu se koristiti za obradu različitih vrsta otpadnih voda (Vymazal 2008, 2010; Vymazal & Kröpfelová 2008; Wallace & Knight 2006, Kadlec & Wallace 2008).

Kod pročišćavanja otpadnih voda u biljnim uređajima koriste se biljke koje prirodno rastu u i uz vodene ekosustave. Prema analizi u knjizi Vymazal & Kröpfelová (2008), na području Europe najčešće se koristi trska (*Phragmites australis* (Cav.) Steud.); rjeđe širokolisni rogoz (*Typha latifolia* L.), trstasti blještac (*Phalaris arundinacea* L.), žuta perunika (*Iris pseudacorus* L.), jezerski oblič (*Scirpus lacustris* L.), razgranjeni ježinac (*Sparganium erectum* L.), velika pirevina (*Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.); a vrlo rijetko neke druge vrste.

Biljke imaju višestruku ulogu: vrlo razvijenim korijenjem stvaraju veliku površinu za razvoj mikroorganizama za koje se smatra da imaju glavnu ulogu u pročišćavanju otpadnih voda, vrše prijenos kisika u zonu korijenja što omogućuje razgradnju organskih tvari, vežu dio hranjivih tvari iz otpadne vode, svojim korijenjem stabiliziraju površinu biljnog uređaja, osiguravaju dobre uvjete za fizičku filtraciju, štite od smrzavanja tijekom hladnog dijela godine, pridonose povećanju estetske vrijednosti biljnih uređaja i drugo (Malus & Vouk 2012).

Budući da je Hrvatska poznata po raznolikosti biljnih vrsta i staništa (Radović 2000), cilj je ovoga rada bio utvrditi koje se samonikle vodene i močvarne biljke mogu koristiti u biljnim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda s obzirom na njihova svojstva kao što su visina, dubina korijenja i ekološki indeksi.

2. METODE RADA

2.1. Odabir biljnih vrsta

U svrhu odabira vodenih i močvarnih vrsta iz skupina papratnjača i sjemenjača korištena je Phytosociological Database of Non-Forest Vegetation in Croatia (Stančić 2012), Nacionalna klasifikacija staništa Republike Hrvatske (NKS 2014) i znanstveni radovi (Stančić 2007, 2008a, 2008b, 2009, 2010; Stančić et al. 2010). Odabrane su vrste koje su s jedne strane česte na vodenim i močvarnim staništima Hrvatske, a s druge strane koje su

zastupljene na različitim tipovima navedenih staništa i time prilagođene različitim ekološkim čimbenicima.

Latinski nazivi vrsta usklađeni su prema Euro+Med PlantBase (2005), dio vrsta koje se ne nalaze u navedenom izvoru prema Flora Europaea, volumen 1-5 (Tutin et al. 1968-1980, 1993). Hrvatski nazivi preuzeti su iz Domac (1994).

2.2. Podjela na vodene i močvarne vrste

Biljke koje se koriste u biljnim uređajima možemo podijeliti u vodene i močvarne vrste.

Vodne biljke su one koje žive u potpunosti uronjene u vodu ili na površini vode imaju plivajuće listove, a cvjetovi i plodovi strše izvan vode. Za njihov opstanak potrebna je stalna prisutnost vode na staništu ili veći dio godine.

Močvarne biljke su one koje rastu ukorijenjene na dnu vodenih staništa, a izvan vode strše njihovi listovi, stabljike, cvjetovi i plodovi. Veći dio habitusa takvih biljaka uglavnom se nalazi izvan vode. Rastu na staništima gdje je stalno prisutna voda, na staništima koja su pod vodom kraći ili duži period, ili čak na staništima bez vode na površini, ali u tom slučaju s visokom razinom podzemne vode.

Za vodene i močvarne biljke u literaturi koristi se zajednički naziv makrofiti koji podrazumijeva makroskopske biljke vidljive golim okom, dok se pod mikrofitima podrazumijevaju mikroskopski vidljive alge (Krausch 1996).

2.3. Visina biljaka

Visina biljaka preuzeta je iz knjiga Flora Europaea, volumen 1-5 (Tutin et al. 1968-1980, 1993). Biljke su prema visini podijeljene u tri skupine: do 50 cm, od 50 do 100 cm i iznad 100 cm. Podjela je rađena posebno za vodene i posebno za močvarne vrste tako da su analizirane vrste svrstane u šest kategorija. Kod izrade grafa u obzir su uzimane srednje vrijednosti visina.

2.4. Dubina korijena

Podaci o dubini korijena preuzeti su iz knjiga: Kutschera (1960) i Kutschera et al. (1982, 1992). Biljke su prema dubini korijena podijeljene u tri skupine: do 50 cm, od 50 do 100 cm i iznad 100 cm. Dubina korijena analizirana je za samo 11 vrsta. Razlog tome je što u literaturi ima vrlo malo podataka o dubini korijenja.

2.5. Ekološki indeksi

Abiotički ekološki čimbenici predstavljaju utjecaje iz nežive prirode na žive organizme. Biljke mogu rasti u određenom rasponu ekoloških čimbenika. Vrijednosti za neke od ekoloških čimbenika u ovome radu izražene su pomoću ekoloških indeksa.

Ekološki indeksi za područje umjerene kontinentalne klime preuzeti su iz Ellenberg et al. (1991), a za područje mediteranske klime iz Pignatti et al. (2005).

Objašnjenje ekoloških indeksa prema [Ellenberg et al. \(1991\)](#):

- za svjetlost (L) – prikazuju srednji godišnji intenzitet svjetlosti potreban biljci za rast, raspon vrijednosti: 1-9 (1 – biljke na staništima s vrlo malo svjetlosti, 9 – biljke na potpuno osvijetljenim mjestima);
- za temperaturu (T) – prikazuju srednju godišnju temperaturu na staništu, raspon vrijednosti: 1-9 (1 – hladna, pretežito planinska područja, 9 – topla, pretežito mediteranska područja);
- za kontinentalnost (K) – prikazuju udaljenost staništa neke biljke od morske obale prema unutrašnjosti, raspon vrijednosti: 1-9 (1 – priobalna područja, 9 – unutrašnjost Europe);
- za vlagu (F) – prikazuju vlažnost tla na staništu, raspon vrijednosti: 1-12 (1 – vrlo suha staništa, 12 – vodena staništa gdje je gotovo uvijek prisutna voda);
- za reakciju tla (R) – prikazuju količinu vapnenca u tlu (što je veći sadržaj vapnenca tlo je manje kiselo), raspon vrijednosti: 1-9 (1 – kisela tla, 9 – bazična tla bogata vapnencem);
- za hranjive tvari (N) – prikazuju količinu mineralnih tvari potrebnih biljci za vrijeme maksimalnog rasta, raspon vrijednosti: 1-9 (1 – staništa vrlo siromašna dušikom, 9 – staništa vrlo bogata dušikom);
- za salinitet (S) – prikazuju koncentracije soli (prvenstveno klorida) u tlu, raspon vrijednosti: 0-9 (0 – biljke koje ne podnose sol na staništu, 9 – biljke na staništima s vrlo visokom koncentracijama soli u tlu).

Ostale korištene oznake prema [Ellenberg et al. \(1991\)](#): X – vrsta nije osjetljiva na oscilacije ekološkog čimbenika, ? – neistraženo ponašanje vrste.

Objašnjenje ekoloških indeksa prema [Pignatti et al. \(2005\)](#):

- za svjetlost (L) – prikazuju intenzitet svjetla na prirodnim staništima potreban biljkama tijekom maksimalnog razvoja lista, raspon vrijednosti: 1-12 (1 – označava hladovinu gdje prolazi svega 1 % svjetlosti, a 12 – potpunu izloženost sunčevom zračenju);
- za temperaturu (T) – prikazuju prosječne godišnje temperature na staništima pojedinih vrsta, raspon vrijednosti: 1-12 (1 – označava izrazito hladna staništa pretežito u visokim planinama, a 12 – vruća mediteranska i pustinjska staništa);
- za kontinentalnost (C) – prikazuju geografsku udaljenost staništa spram mora i oceana, raspon vrijednosti: 1-9 (1 – prikazuje vrste uz morsku obalu, a 9 – vrste rasprostranjene duboko u kontinentalnom području);
- za vlagu (U) – prikazuju stupnjeve vlažnosti tla, raspon vrijednosti: 1-12 (1 – predstavlja vrlo suha staništa gdje rastu vrste s dubokim korijenjem, 12 – vodena staništa gdje rastu vodne biljke);
- za reakciju tla (R) – prikazuju kiselost ili alkaličnost tla, raspon vrijednosti: 1-9 (1 – označava vrlo kisela tla, a 9 – vrlo lužnata tla);

- za hranjive tvari (N) – prikazuju ponašanje vrsta spram količine hranjivih tvari u tlu, raspon vrijednosti: 1-9 (1 – označava slabu zastupljenost dušika, nitrata i organskih tvari, a 9 – njihovu dobru zastupljenost na staništu);
- za salinitet (S) – prikazuju udio soli u vodi ili tlu, raspon vrijednosti: 1-3 (1 – predstavlja staništa s niskim koncentracijama soli, a 3 – staništa s visokim koncentracijama soli u tlu).

Ostale korištene oznake prema [Pignatti et al. \(2005\)](#): X – široki raspon vrijednosti, 0 – nedovoljno informacija.

Ovdje su objašnjene samo minimalne i maksimalne brojčane vrijednosti ekoloških indeksa, dok se detaljna objašnjenja svih vrijednosti nalaze u originalnim radovima ([Ellenberg et al. 1991](#); [Pignatti et al. 2005](#)).

3. REZULTATI RADA I RASPRAVA

U ovom radu analizirano je 80 samoniklih zeljastih biljnih vrsta koje rastu na vodenim i močvarnim staništima Hrvatske te imaju potencijal za korištenje u biljnim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda.

Popis biljaka i svi prikupljeni podaci nalaze se u **Tablici 1** na kraju rada.

Neke od najčešćih vodenih i močvarnih vrsta prikazane su na **Slikama 17-30** na kraju rada.

Drvenaste vrste nisu uključene u analizu zbog njihove potrebe za velikim podzemnim prostorom, dubokog korijenja i velike snage korijenja koje može probiti nepropusni sloj uređaja.

3.1. Vodene i močvarne biljne vrste

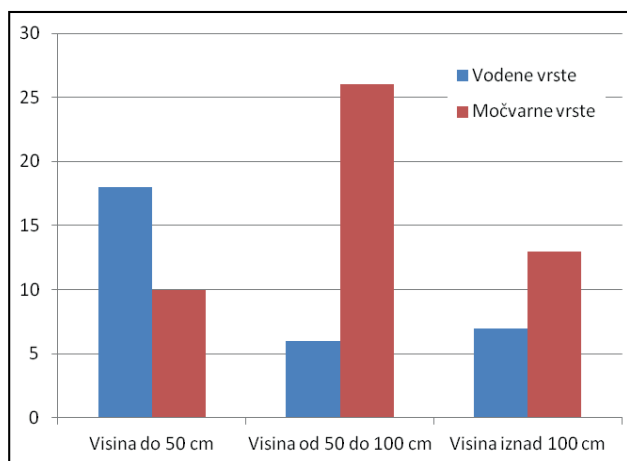
Među 80 analiziranih vrsta utvrđeno je 49 močvarnih vrsta i 31 vrsta vodenih biljaka. Močvarne vrste su zbog karakteristika svojeg rasta pogodne za biljne uređaje sa slobodnim vodnim licem i za biljne uređaje s podpovršinskim tokom. Vodene vrste su pogodne samo za biljne uređaje sa slobodnim vodnim licem ([Malus & Vouk 2012](#)) ili za tzv. površinske uređaje ([Ružinski & Anić Vučinić 2010](#)) i to za one tipove gdje biljke ili slobodno plutaju po površini ili su potpuno uronjene u vodu. Neke vrste vodenih biljaka stvaraju veliku biomasu u relativno kratkom vremenu i takve biljke je potrebno u određenim vremenskim razmacima uklanjati ([Sim 2003](#)). Uklanjanje vodenih biljaka potrebno je zbog toga što gusto razvijene biljke počinju obamirati i taložiti se na dnu bazena i time ponovno otpuštati hranjive tvari koje su prethodno uklonjene iz otpadne vode. Prilikom odstranjivanja biljaka uvijek treba ostaviti jedan njihov dio u uređaju kako bi se mogle ponovno obnoviti.

3.2. Visina biljaka

Analiza biljaka prema visini prikazana je na grafu (**Slika 1**). Odabrane vrste zastupljene su u svim kategorijama, s time da su u kategoriji visine do 50 cm više zastupljene vodene vrste, dok su u kategorijama od 50 do 100 cm i iznad 100 cm više zastupljene močvarne vrste.

Podaci o visini vodenih i močvarnih biljaka daju mogućnost odabira vrsta prema tehničkim zahtjevima uređaja. Neke vrste s većom visinom mogu stvarati veću

biomasu i time iz otpadne vode ukloniti više hranjivih tvari. Među analiziranim vrstama u najviše močvarne biljke spadaju: trska (*Phragmites australis*), močvarni ljutak (*Cladium mariscus* (L.) Pohl), velika pirevina (*Glyceria maxima*), jezerski oblič (*Scirpus lacustris*), širokolisni rogoz (*Typha latifolia*); a među najviše vodene: klasasti krocanj (*Myriophyllum spicatum* L.), pršljenasti krocanj (*Myriophyllum verticillatum* L.) i plutajući mriješnjak (*Potamogeton nodosus* Poir.).

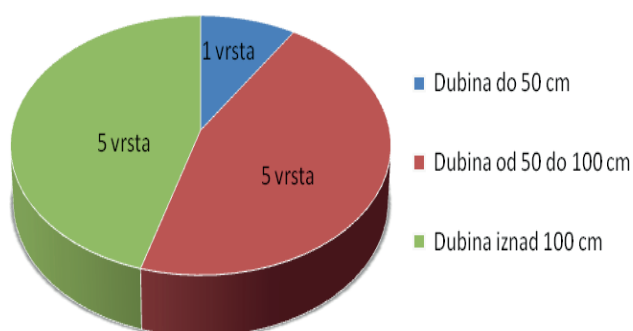


Slika 1. Analiza vodenih i močvarnih biljnih vrsta prema visini

3.3. Dubina korijena

Među analiziranim vrstama (Slika 2) samo jedna vrsta pripada kategoriji dubine korijena do 50 cm, 5 vrsta kategoriji dubine korijena od 50 do 100 cm i 5 vrsta kategoriji dubine korijena iznad 100 cm.

Prilikom konstrukcije uređaja važno je znati dubinu korijena kako bi se odredila optimalna visina supstrata u koji će se zasaditi biljke, a ujedno je važna i razgranatost korijenovog sustava zbog toga što se u zoni rizosfere nalazi najveći broj mikroorganizama koji imaju važnu ulogu u pročišćavanju otpadnih voda (U.S. EPA 1988).

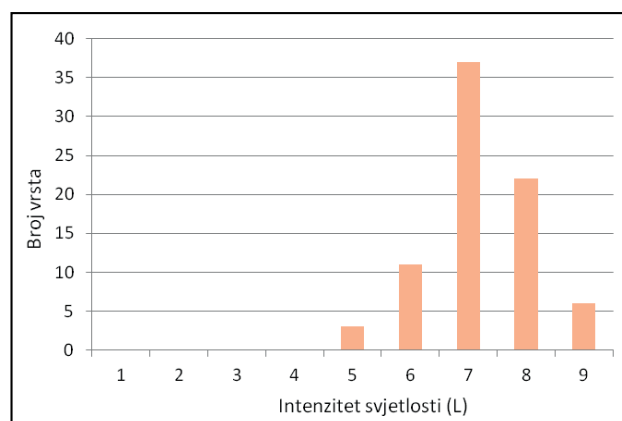


Slika 2. Analiza dubine korijena vodenih i močvarnih biljnih vrsta

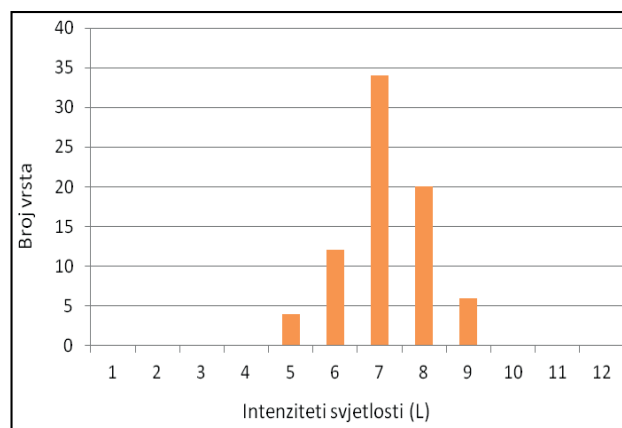
3.4. Ekološki indeksi

3.4.1. Svjetlost

Rezultati analize ekoloških indeksa za svjetlost prema Ellenberg et al. (1991) prikazani su na Slici 3. Ukupno je analizirano 79 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom svjetlosti 7 (37 vrsta), zatim slijede vrste s indeksom 8 (22 vrste), 11 vrsta s indeksom 6, 6 vrsta s indeksom 9 i 3 vrste s indeksom 5. Među analiziranim vrstama nalaze se biljke koje mogu uspijevati u rasponu osvjetljenosti od onih koje rastu u polusjeni (npr. klasasti krocanj – *Myriophyllum spicatum*) (indeks 5) do onih koje rastu na potpuno osvjetljenim staništima (npr. močvarni ljutak – *Cladium mariscus*) (indeks 9).



Slika 3. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za svjetlost prema Ellenberg et al. (1991)



Slika 4. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za svjetlost prema Pignatti et al. (2005)

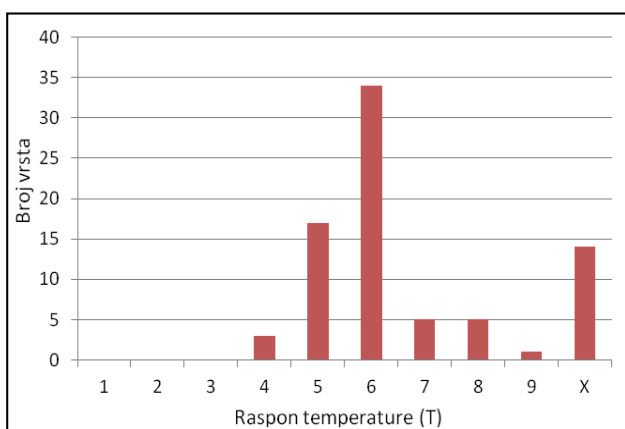
Rezultati analize ekoloških indeksa za svjetlost prema Pignatti et al. (2005) prikazani su na Slici 4. Ukupno je analizirano 76 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom svjetlosti 7 (34 vrste), zatim slijede vrste s indeksom 8 (20 vrsta), s indeksom 6 (12 vrsta), s indeksom 9 (6 vrsta) i s indeksom 5 (4 vrste). Među analiziranim vrstama nalaze se biljke prilagođene na čitav raspon ekološkog čimbenika, od biljaka hlada koje mogu podnijeti kratku izloženost direktnom sunčevom zračenju (npr. mekana voščika – *Ceratophyllum submersum* L.) (indeks 5) do onih koje

rastu potpuno izložene suncu u blagoj klimi s čestim oblacima (npr. obalni oblič – *Scirpus litoralis* Schrad.) (indeks 9).

Na temelju podataka o indeksima svjetlosti za kontinentalni (Ellenberg et al. 1991) i mediteranski dio Hrvatske (Pignatti et al. 2005) može se vršiti odabir biljnih vrsta ovisno o zahtijevanoj osvjetljenosti uređaja. Npr. uređaji mogu biti smješteni u djelomičnoj sjeni obližnjih objekata ili stabala drveća ili direktno izloženi sunčevoj svjetlosti.

3.4.2. Temperatura

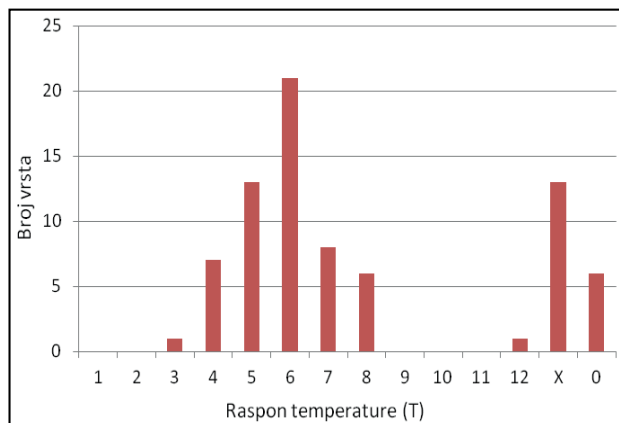
Rezultati analize ekoloških indeksa za temperaturu prema Ellenberg et al (1991) prikazani su na Slici 5. Ukupno je analizirano 79 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom temperature 6 (34 vrste), zatim slijede vrste s indeksom 5 (17 vrsta), 14 vrsta koje imaju veliku toleranciju spram oscilacija temperature s oznakom X, po 5 vrsta s indeksom temperature 7 i 8, 3 vrste s indeksom 4 i 1 vrsta s indeksom 9. Dakle, u setu podataka zastupljene su vrste od onih koje žive na nižim temperaturama u visokim gorama (npr. riječna preslica – *Equisetum fluviatile* L.) (indeks 4) do onih koje žive na vrlo toplim staništima mediteranske klime (npr. četverolisna raznorotka – *Marsilea quadrifolia* L.) (indeks 9) te onih koje imaju širok raspon tolerancije na temperaturu (npr. potočna čestoslavica – *Veronica beccabunga* L.) (indeks X).



Slika 5. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za temperaturu prema Ellenberg et al. (1991)

Rezultati analize ekoloških indeksa za temperaturu prema Pignatti et al. (2005) prikazani su na Slici 6. Ukupno je analizirano 79 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom temperature 6 (21 vrsta), zatim s po 13 vrsta slijedi indeks 5 i skupina s oznakom X, 8 vrsta s indeksom 7, 7 vrsta s indeksom 4, po 6 vrsta s indeksom 8 i s oznakom 0 te po 1 vrsta s indeksom 3 i 12. Može se vidjeti da su dobiveni rezultati vrlo slični onima kod analize ekoloških indeksa za temperaturu prema Ellenberg et al. (1991) s tom razlikom da je ovdje izdvojena skupina s oznakom 0 koja obuhvaća biljke s nedovoljno informacija o prilagodbama određenoj temperaturi (npr. patuljasti rogoz – *Typha minima* Hoppe).

Podaci o ekološkim indeksima za temperaturu mogu biti korisni prilikom odabira vrsta za biljne uređaje u područjima s različitim vrijednostima srednjih mjesečnih i godišnjih temperatura zraka.



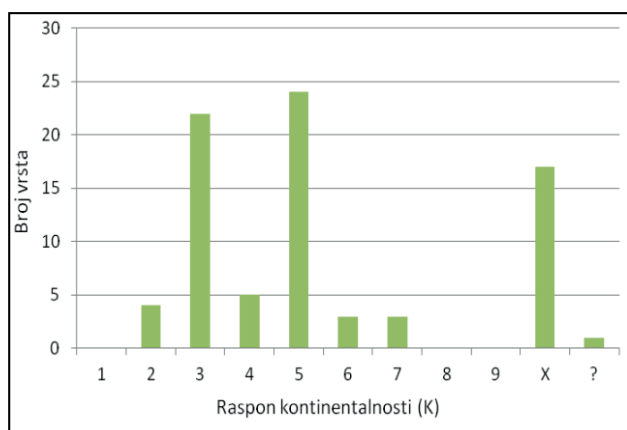
Slika 6. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za temperaturu prema Pignatti et al. (2005)

3.4.3. Kontinentalnost

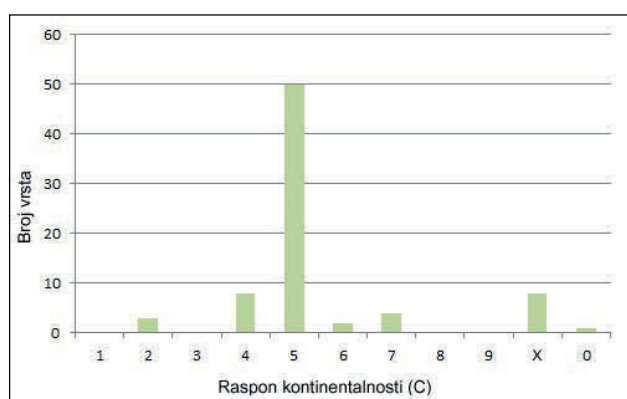
Rezultati analize ekoloških indeksa za kontinentalnost prema Ellenberg et al. (1991) prikazani su na Slici 7. Ukupno je analizirano 79 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom 5 (24 vrste), zatim slijede vrste s indeksom 3 (22 vrste), 17 vrsta koje imaju veliku toleranciju spram kontinentalnosti (oznaka X), dok su znatno manje zastupljene vrste s indeksom 4 (5 vrsta), s indeksom 2 (4 vrste), s indeksom 6 i 7 (po 3 vrste) te skupina s nepoznatim ponašanjem vrste s oznakom ? (1 vrsta). Kao što je vidljivo vodene i močvarne vrste pokazuju različito ponašanje u odnosu na svojstvo kontinentalnosti, od onih koje dolaze u blizini morske obale (npr. obični ljepušak – *Hydrocotyle vulgaris* L.) (indeks 2) do onih koje rastu duboko u kontinentu (npr. amfibijski grbak – *Rorippa amphibia* (L.) Besser) (indeks 7), uključujući i vrste koje ne pokazuju pravilnost u pojavljivanju u odnosu na udaljenost od morske obale (npr. trska – *Phragmites australis*) (oznaka X).

Rezultati analize ekoloških indeksa za kontinentalnost prema Pignatti et al. (2005) prikazani su na Slici 8. Ukupno je analizirano 76 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom kontinentalnosti 5 (50 vrsta), zatim sa znatno manje vrsta slijedi indeks 4 i skupina s oznakom X (po 8 vrsta), indeks 7 (4 vrste), indeks 2 (3 vrste), indeks 6 (2 vrste) te skupina s nedovoljno informacija o vrsti s oznakom ? (1 vrsta). Dobiveni rezultati su slični onima kao kod analize ekoloških indeksa za kontinentalnost prema Ellenberg et al. (1991) s tom razlikom da je ovdje daleko najbrojnija skupina koja pripada indeksu 5, a u koju se ubrajaju biljke s područja srednje umjerene klime (npr. močvarna jezernica – *Eleocharis palustris* (L.) R. Br.) (Pignatti et al. 2005).

Temeljem podataka o kontinentalnosti mogu se izabrati vrste prilagođene različitim klimatskim uvjetima, od kontinentalne do mediteranske klime, ovisno o lokaciji gdje se uređaj gradi.



Slika 7. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za kontinentalnost prema Ellenberg et al. (1991)



Slika 8. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za kontinentalnost prema Pignatti et al. (2005)

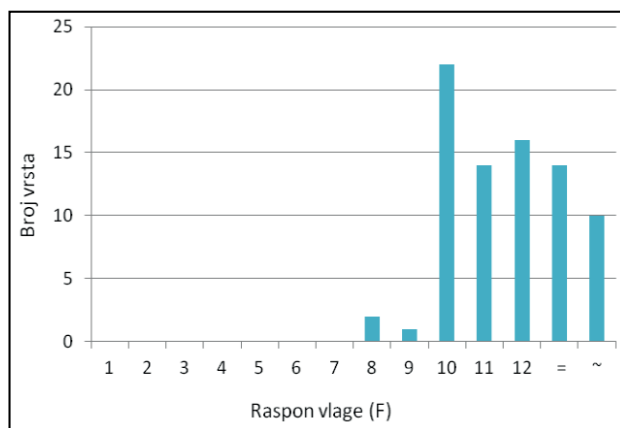
3.4.4. Vlaga

Rezultati analize ekoloških indeksa za vlagu prema Ellenberg et al. (1991) prikazani su na Slici 9. Ukupno je analizirano 79 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom vlage 10 (22 vrste), zatim slijede vrste s indeksom 12 (16 vrsta), s indeksom 11 i skupina biljaka na povremeno poplavljenim staništima s oznakom = (po 14 vrsta), skupina biljaka na staništima s velikim oscilacijama vlažnosti s oznakom ~ (10 vrsta), a najmanje je zastupljen indeks 8 (2 vrste) i indeks 9 (1 vrsta). Kao što je vidljivo (Slika 9) među analiziranim vrstama zastupljene su različite skupine biljaka od onih koje rastu na vlažnim staništima bez poplavne vode (npr. močvarna preslica – *Equisetum palustre* L.) (indeks 8) do onih koje žive potopljene u vodi (npr. podvodna vodena leća – *Lemna trisulca* L.) (indeks 12) te vrste koje podnose povremeno poplavljanje (npr. žuta perunika – *Iris pseudacorus*) i velike oscilacije vlage na staništu (npr. purpurna vrbica – *Lythrum salicaria* L.).

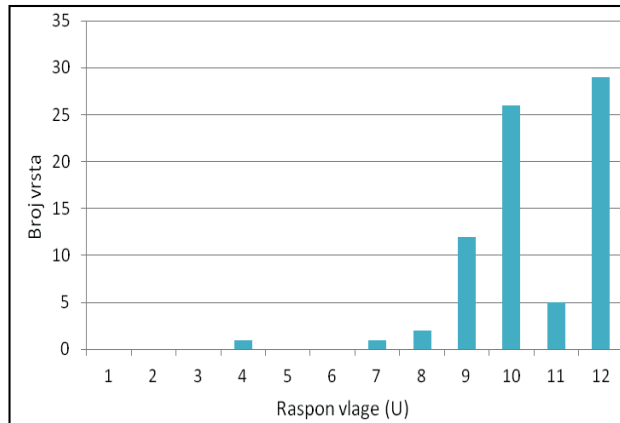
Rezultati analize ekoloških indeksa za vlagu prema Pignatti et al. (2005) prikazani su na Slici 10. Ukupno je analizirano 76 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom vlage 12 (29 vrsta), zatim slijede biljke s indeksom 10 (26 vrsta), s indeksom 9 (12 vrsta), s indeksom 11 (5 vrsta), s indeksom 8 (2 vrste) te s indeksima 4 i 7 (po 1 vrsta). Iako se objašnjenja za indekse pod istim brojevima razlikuju

između Ellenberg et al. (1991) i Pignatti et al. (2005), s time da Ellenberg et al. (1991) imaju još i dodatne oznake, u suštini su dobiveni vrlo slični rezultati.

Rezultati ovoga rada upućuju da se za izgradnju uređaja za pročišćavanje otpadnih voda mogu odabrati različite biljke, od onih koje su prilagođene stalnoj prisutnosti vode na staništu, onih koje mogu podnositi velike oscilacije vlage prilikom rada uređaja do onih koje mogu rasti na vlažnom supstratu bez stagnirajuće vode na površini.



Slika 9. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za vlagu prema Ellenberg et al. (1991). Kratice: ~ – veće oscilacije vlage na staništu, = – pokazatelj povremeno poplavljenih područja

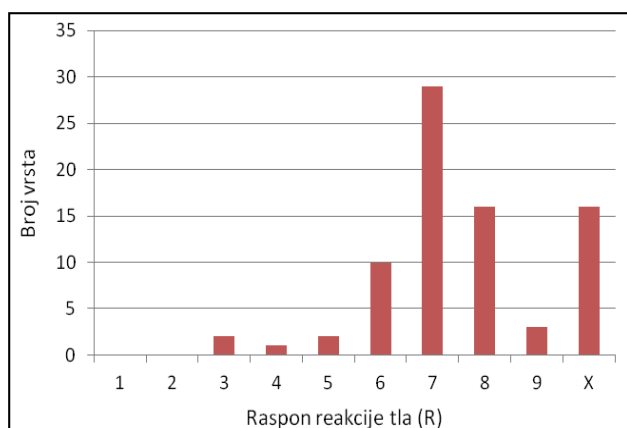


Slika 10. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za vlagu prema Pignatti et al. (2005)

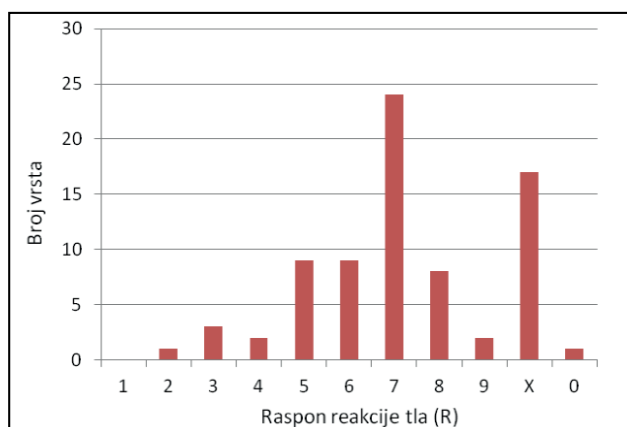
3.4.5. Reakcija tla

Rezultati analize ekoloških indeksa za reakciju tla prema Ellenberg et al. (1991) prikazani su na Slici 11. Ukupno je analizirano 79 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom reakcije 7 (29 vrsta), zatim slijedi indeks 8 i skupina biljaka s oznakom X (po 16 vrsta), indeks 6 (10 vrsta), indeks 9 (3 vrste), indeksi 3 i 5 (po 2 vrste) i indeks 4 (1 vrsta). Analizom prilagodbe biljaka na reakciju tla pokazalo se da su u setu podataka zastupljene različite kategorije, od onih biljaka koje mogu rasti na kiselim tlima (npr. kljunasti šaš – *Carex rostrata* Stokes) (indeks 3), do onih koje mogu rasti na alkaličnim tlima (npr. močvarni ljutak – *Cladium mariscus*) (indeks 9), a najbrojnije su one

koje imaju optimum razvitka u neutralnom do blago kiselom ili blago alkaličnom području (npr. trstasti blještac – *Phalaris arundinacea*) (indeks 7), s time da postoje i vrste koje mogu podnijeti vrlo široki raspon reakcije tla (npr. žuta perunika - *Iris pseudacorus*) (indeks X).



Slika 11. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za reakciju tla prema Ellenberg et al. (1991)



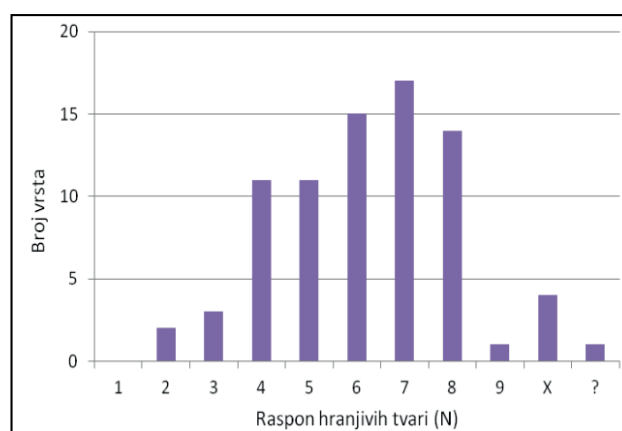
Slika 12. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za reakciju tla prema Pignatti et al. (2005)

Rezultati analize ekoloških indeksa za reakciju tla prema Pignatti et al. (2005) prikazani su na Slici 12. Ukupno je analizirano 76 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom reakcije tla 7 (24 vrste), zatim slijedi skupina biljaka s oznakom X (17 vrsta), indeksi 5 i 6 (po 9 vrsta), indeks 8 (8 vrsta), indeks 3 (3 vrste), indeksi 4 i 9 (po 2 vrste) te indeks 2 i skupina biljaka s nedovoljno informacija s oznakom 0 (po 1 vrsta). Dobiveni su vrlo slični rezultati kao i kod analize reakcije tla prema Ellenberg et al. (1991) s tom razlikom da je ovdje još dodatno izdvojena skupina biljaka za koju ne postoji dovoljno informacija.

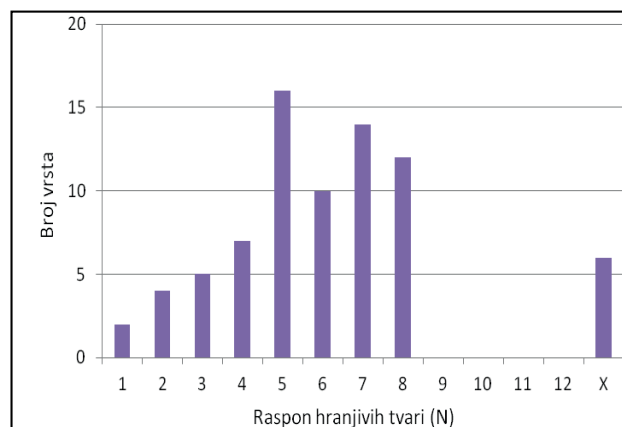
Podaci o reakciji supstrata za pojedine biljne vrste vrlo su važni jer se otpadne vode razlikuju prema svojoj pH vrijednosti.

3.4.6. Hranjive tvari

Rezultati analize ekoloških indeksa za hranjive tvari prema Ellenberg et al. (1991) prikazani su na Slici 13. Ukupno je analizirano 79 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom 7 (17 vrsta), zatim slijedi indeks 6 (15 vrsta), indeks 8 (14 vrsta), indeksi 4 i 5 (po 11 vrsta), skupina s oznakom X (4 vrste), indeks 3 (3 vrste), indeks 2 (2 vrste) te indeks 9 i skupina s oznakom ? (po 1 vrsta). Rezultati pokazuju da su u setu podataka zastupljene biljke koje mogu rasti u rasponu od staništa siromašnih hranjivim tvarima (npr. patuljasti rogoz – *Typha minima*) (indeks 2), do onih koja su iznimno bogata hranjivim tvarima (npr. velika pirevina – *Glyceria maxima*) (indeks 9), a postoje i vrste koje pokazuju vrlo široku toleranciju na količinu hranjivih tvari (obični borak – *Hippuris vulgaris* L.) (indeks X) te vrste za koje ne postoji dovoljno informacija (?).



Slika 13. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za hranjive tvari tla prema Ellenberg et al. (1991)



Slika 14. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za hranjive tvari prema Pignatti et al. (2005)

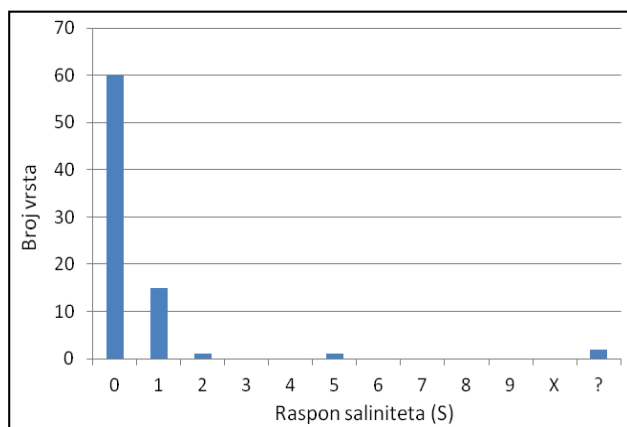
Rezultati analize ekoloških indeksa za hranjive tvari prema Pignatti et al. (2005) prikazani su na Slici 14. Ukupno je analizirano 76 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom hranjivih tvari 5 (16 vrsta), zatim slijedi indeks 7 (14 vrsta), indeks 8 (12 vrsta), indeks 6 (10 vrsta), indeks

4 (7 vrsta), skupina s oznakom X (6 vrsta), indeks 3 (5 vrsta), indeks 2 (4 vrste) i indeks 1 (2 vrste). Dobiveni rezultati (Slika 14) vrlo su slični s rezultatima analize ekoloških indeksa za hranjive tvari prema Ellenberg et al. (1991) (Slika 13).

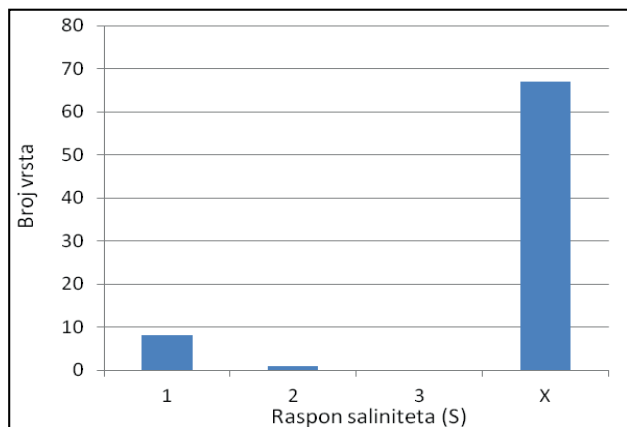
Otpadne vode mogu biti opterećene različitim koncentracijama hranjivih tvari pa indeksi za hranjive tvari omogućuju optimalni odabir biljnih vrsta. Ukoliko su vode više opterećene hranjivim tvarima pogodnije su vrste s većim indeksom.

3.4.7. Salinitet

Rezultati analize ekoloških indeksa za salinitet prema Ellenberg et al. (1991) prikazani su na Slici 15. Ukupno je analizirano 79 vrsta. Najzastupljenije su vrste s indeksom 0 (60 vrsta), zatim slijedi indeks 1 (15 vrsta), skupina biljaka s oznakom ? (2 vrste) te indeksi 2 i 5 (po 1 vrsta). Na osnovi analize dobiveno je da većina ispitivanih vrsta ne podnosi sol u tlu (indeks 0), jedan dio podnosi manje koncentracije soli do 0,1 % Cl (npr. jezerski oblič – *Scirpus lacustris*) (indeks 1), dok samo dvije vrste podnose nešto veću koncentraciju soli u podlozi (primorski rančić – *Scirpus maritimus* L.) (indeks 2) i (žabokrečina – *Zannichellia palustris* L.) (indeks 5).



Slika 15. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za salinitet prema Ellenberg et al. (1991)



Slika 16. Analiza ekoloških indeksa vodenih i močvarnih vrsta za salinitet prema Pignatti et al. (2005)

Rezultati analize ekoloških indeksa za salinitet prema Pignatti et al. (2005) prikazani su na Slici 16. Ukupno je analizirano 76 vrsta. Najzastupljenije su vrste s oznakom X (67 vrsta), zatim slijedi indeks 1 (8 vrsta) i indeks 2 (1 vrsta). Dobiveni su vrlo slični rezultati kao i kod analize indeksa prema Ellenberg et al. (1991) s time da su na Slici 15 biljke koje ne podnose sol na staništu označene indeksom 0, a na Slici 16 oznakom X.

Podaci o salinitetu ukazuju da li su pojedine vrste prilagođene povišenim koncentracijama soli u tlu na osnovi čega se mogu odabrati biljke u priobalnim područjima gdje postoji utjecaj morske ili bočate vode u biljnim uređajima.

3.5. Mogućnosti korištenja samoniklih biljnih vrsta u biljnim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda u Hrvatskoj

U Hrvatskoj, s obzirom na potrebe pročišćavanja otpadnih voda (Tušar 2009), naročito objekata udaljenih od sustava javne odvodnje (Kivaisi 2001), postoje mogućnosti i potrebe za izgradnju novih biljnih uređaja. Zasad je u našoj zemlji izgrađen relativno mali broj takvih uređaja (Bieco 2003; Shalabi 2004; Ružinski & Anić Vučinić 2010; Nadilo 2013; Šperac et al. 2013):

- autokamp Bijar na otoku Cresu, za otpadne vode autokampa, zasađen trskom, prvi biljni uređaj u Hrvatskoj;
- pilot biljni uređaj Jakuševac kod Zagreba, za pročišćavanje dijela procijednih voda odlagališta otpada, zasađen trskom;
- autokamp Glavotok na otoku Krku, izgrađen za obradu otpadnih voda iz autokampa, zasađen trskom;
- autokamp Politin na otoku Krku, za otpadne vode autokampa;
- Žminj u Istri, za komunalne otpadne vode, zasađen trskom i lepršavim sitom (*Juncus effusus* L.);
- Vinogradci između Belišća i Valpova, za komunalne otpadne vode, zasađen trskom;
- Lukač kod Virovitice, za komunalne otpadne vode, zasađen trskom;
- Vrlika, za komunalne otpadne vode;
- Goričica kod Siska, za pročišćavanje procijednih voda odlagališta otpada;
- pilot biljni uređaj Hrušćica kod Ivanja Reke, zasađen šašem;
- još nekoliko uređaja u fazi je projektiranja i izgradnje.

Prema navedenim podacima u većini uređaja u Hrvatskoj koristi se trska.

Nadalje, u dostupnim publikacijama o biljnim uređajima nudi se tek nekoliko vrsta koje je moguće upotrijebiti (Vymazal & Kröpfelová 2008; Malus & Vouk 2012; Ružinski & Anić Vučinić 2010), s time da su neki radovi napisani za druga klimatska i geografska područja (U.S. EPA 1988, 2000; Sim 2003; Surrency et al. 2003, Wallace & Knight 2006; Taylor 2009) te sadrže vrste koje uglavnom ne rastu na prirodnim staništima Europe.

U ovome radu predlaže se 80 vrsta (49 močvarnih i 31 vodenih) između kojih se može izabrati jedna ili više koje

svojim morfološkim osobinama i prilagodbama na prirodnim staništima, izraženim pomoću ekoloških indeksa, mogu biti pogodne za specifične uvjete pojedinih biljnih uređaja. Analizirana svojstva pokazuju koje je vrste najbolje izabrati s obzirom na visinu biljaka (količinu biomase), dubinu supstrata, osvjetljenost uređaja, prosječne mjesečne i godišnje temperature lokacije, prisutnost površinske i podpovršinske vode u uređaju i njezine oscilacije, pH reakciju otpadne vode, količinu hranjivih tvari i salinitet (**Tablica 1**).

Nadalje, usporedba rezultata analize ekoloških indeksa prema [Ellenberg et al. \(1991\)](#) i [Pignatti et al. \(2005\)](#) pokazuje vrlo slične vrijednosti, s time da su ekološki čimbenici prema [Pignatti et al. \(2005\)](#), osim saliniteta, više raščlanjeni nego prema [Ellenberg et al. \(1991\)](#). Nadalje, kod primjene treba uzimati u obzir da ekološki indeksi prema [Ellenberg et al. \(1991\)](#) više odgovaraju za kontinentalni dio, a prema [Pignatti et al. \(2005\)](#) za mediteranski dio Hrvatske.

Prilikom odabira biljaka trebalo bi isključivo birati autohtone vrste koje prirodno rastu na močvarnim staništima područja gdje se uređaj gradi zbog njihove prilagođenosti klimi. Također, trebalo bi birati one vrste koje imaju tendenciju brzog stvaranja velike biomase i koje su dominantne na svojim prirodnim staništima kao što su: trska (*Phragmites australis*; **Slika 17 i 18**), trsci sličan trsasti blještac (*Phalaris arundinacea*; **Slika 19 i 20**), širokolisni rogoz (*Typha latifolia*; **Slika 21 i 22**), močvarni ljutak (*Cladium mariscus*; **Slika 23 i 25**), kruti šaš (*Carex elata* All.; **Slika 24**), rižasta tajnica (*Leersia oryzoides* (L.) Sw.; **Slika 26**), razgranjeni ježinac (*Sparganium erectum*; **Slika 27**), žuta perunika (*Iris pseudacorus*; **Slika 28**), riječna preslica (*Equisetum fluviatile*; **Slika 29**), klasasti krocanj (*Myriophyllum spicatum*; **Slika 30**) te druge vrste. Također se preporuča konzultirati biologa specijaliziranog za vodenu i močvarnu vegetaciju.

Na primjer, za pročišćavanje komunalnih otpadnih voda, otpadnih voda s farmi i sl., koje sadrže velike količine hranjivih tvari, koje su približno neutralne reakcije, u uvjetima kontinentalne klime, pogodne su sljedeće biljke: trska (*Phragmites australis*); širokolisni rogoz (*Typha latifolia*), jezerski oblič (*Scirpus lacustris*), velika pirevina (*Glyceria maxima*), trstasti blještac (*Phalaris arundinacea*), razgranjeni ježinac (*Sparganium erectum*), žuta perunika (*Iris pseudacorus*), klasasti krocanj (*Myriophyllum spicatum*), mala vodena leća (*Lemna minor* L.), podvodna vodena leća (*Lemna trisulca* L.) i druge.

U Hrvatskoj zasad ne postoji komercijalna prodaja samoniklih vodenih i močvarnih vrsta u rasadnicima. Jedina mogućnost je da se vrste presade s prirodnih staništa ili da se sakupi njihovo sjeme i zasije. U tu svrhu potrebno je nabaviti odgovarajuće dozvole Državnog zavoda za zaštitu prirode i nadležnog ministarstva, a kod vađenja biljaka s prirodnih staništa treba paziti da se ta prirodna staništa što manje unište i da ostane dovoljno individua potrebnih za njihov opstanak u prirodi.

Nikako se ne preporuča korištenje stranih, a posebice invazivnih vrsta ([Boršić et al. 2008](#)), kao što je na primjer kanadska vodena kuga (*Elodea canadensis* Michx.; **Slika 31**), zbog opasnosti za biološku raznolikost područja i očuvanja autohtone flore i vegetacije.

U biljnim uređajima može se koristiti jedna i više vrsta. Korištenje većeg broja vrsta može povećati učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda. Biljni uređaji s više biljnih vrsta mogu služiti kao zamjenska staništa za ugrožene biljne i životinjske vrste koje sve više nestaju zbog gubitka prirodnih staništa, mogu imati edukativnu ulogu te povećati estetsku vrijednost krajobraza u kojem se nalaze.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovi rezultata ovoga rada može se zaključiti sljedeće:

- U biljnim uređajima koji će se u budućnosti graditi u Hrvatskoj može se upotrijebiti daleko veći broj vrsta nego što se trenutno koristi. U ovome radu obrađeno je 49 vrsta močvarnih i 31 vrsta vodenih biljaka, koje su ili česte u flori Hrvatske ili su karakteristične za različite tipove vodenih i močvarnih staništa.
- Prilikom odabira vrsta treba obratiti pozornost na njihova morfološka svojstva (visinu, dubinu korijenja) i prilagodbe na ekološke čimbenike prirodnih staništa (svjetlost, temperaturu, kontinentalnost, vlagu, reakciju tla, hranjive tvari, salinitet) (**Tablica 1**).
- Preporuka je da se koriste autohtone vodene i močvarne biljke koje su dominantne na prirodnim staništima, odnosno koje stvaraju znatnu biomasu.

5. LITERATURA

Bieco (2003) Bieco, zaštita okoliša, tehnologija za biljni uređaj. Rijeka, dostupno: <http://www.bieco.hr/hr/biljni.htm>, korišteno: 15.05.2016.

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

Domac R (1994) Flora Hrvatske, Priručnik za određivanje bilja. Školska knjiga, Zagreb

Ellenberg H, Weber H, Düll R, Wirth V, Werner W, Paulißen D (1991) Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scr Geobot 18:1-258

Euro+Med PlantBase (2005) dostupno: www.em-plantbase.org, korišteno: 24.04.2016.

Kadlec RH, Wallace SD (2008) Treatment Wetlands. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, Florida

Kivaisi AK (2001) The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. Ecol Eng 16 (4): 545-560

Krausch H-D (1996) Farbatlas Wasser- und Uferpflanzen. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Kutschera L (1960) Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main

Kutschera L, Lichtenegger E, Sobotik M (1982) Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart

Kutschera L, Lichtenegger E, Sobotik M (1992) Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart

Malus D, Vouk D (2012) Priručnik za učinkovitu primjenu biljnih uređaja za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda. Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

Nadilo B (2013) Biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda u Vrlici, jeftinija gradnja i veća učinkovitost. Građevinar 65: 931-941

- NKS - Nacionalna klasifikacija staništa Republike Hrvatske (2014) Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb, dostupno: <http://www.dzpp.hr/stanista/nacionalna-klasifikacija-stanista-rh/nacionalna-klasifikacija-stanista-rh-740.html>, korišteno: 25.04.2016.
- Pignatti S, Menegoni P, Pietrosanti S (2005) Valori di bioindicazione delle piante vascolari della Flora d'Italia. *Braun-Blanquetia* 39:3-97
- Radović J (ed) (2000) An Overview of the State of Biological and Landscape Diversity of Croatia with the Protection Strategy and Action Plans. Ministry of Environmental Protection and Physical Planning, Nature Protection Division, Zagreb
- Ružinski N, Anić Vučinić A (2010) Obrada otpadnih voda biljnim uređajima. Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb
- Shalabi M (2004) Constructed wetlands in Croatian Adriatic area. In: Proc. 9th Internat. Conf. Wetland Systems for Water Pollution Control, ASTEE 2004 and Cemagref, Lyon, France, pp. 307-312
- Sim CH (2003) The use of constructed wetlands for wastewater treatment. Wetlands International - Malaysia Office, Selangor
- Stančić Z (2007) Marshland vegetation of the class *Phragmito-Magnocaricetea* in Croatia. *Biologia* 62 (3):297-314
- Stančić Z (2008a) New plant community (*Caricetum buekii* Hejny et Kopecký in Kopecký et Hejny 1965) from Croatia. *Nat Croat* 17 (1):15-26
- Stančić Z (2008b) Ass. *Eleocharitetum palustris* Schennikow 1919 in Croatia. *Nat Croat* 17 (4):335-355
- Stančić Z (2009) The species *Carex randalpina* B. Walln. and association *Filipendulo ulmariae-Caricetum randalpiniae* ass. nov. hoc loco in Croatia. *Nat Croat* 18 (2):353-366
- Stančić Z (2010) Marshland vegetation of the class *Phragmito-Magnocaricetea* in northwest Croatia (Krapina river valley). *Biologia* 65 (1):39-53
- Stančić Z (2012) Phytosociological Database of Non-Forest Vegetation in Croatia. Short Database Report. In: Dengler J, Oldeland J, Jansen F, Chytrý M, Ewald J, Finckh M, Glöckler F, Lopez-Gonzalez G, Peet RK, Schaminée JHJ (eds) Vegetation databases for the 21st century. *Biodiversity & Ecology* 4:391-391
- Stančić Z, Žganec K, Gottstein S (2010) Marshland vegetation of Plitvice Lakes National Park in Croatia. *Candollea* 65 (1):147-167
- Surrency D, Carter J, Owsley CM, Kirkland M (2003) Wetland plants selected for constructed wetlands and stormwater systems. USDA Natural Resources Conservation Service, Thomson, Georgia
- Šperac M, Kaluder J, Šreng Ž (2013) Biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda. *e-GFOS* 7:76-86 <http://dx.doi.org/10.13167/2013.7.8>
- Taylor CR (2009) Selecting plant species to optimize wastewater treatment in constructed wetlands. PhD thesis. Montana State University, Bozeman, Montana
- Tušar B (2009) Pročišćavanje otpadnih voda. Kigen i Gfv, Zagreb
- Tutin TG, Burges NA, Chater AO, Edmondson JR, Heywood VH, Moore DM, Valentine DH, Walters SM, Webb DA (eds) (1993) *Flora Europaea* 1. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge
- Tutin TG, Heywood VH, Burges NA, Moore DM, Valentine DH, Walters SM, Webb DA (eds) (1964-1980) *Flora Europaea* 1-5. Cambridge University Press, Cambridge
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) (1988) Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. Design Manual. EPA/625/1-88/022. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio
- U.S. EPA (2000) Constructed wetlands treatment of municipal wastewater. Manual. EPA 625/R-99/010, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio
- Vymazal J (2008) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. In: Sengupta M, Dalwani R (eds) The 12th World Lake Conference, Proceedings of Taal 2007. Jaipur, India, pp. 965-980
- Vymazal J (2010) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water* 2: 530-549
- Vymazal J, Kröpfelová L (2008) Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Springer, Dordrecht, The Netherlands
- Wallace SD, Knight RL (2006) Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems. Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements. Water Environment Research Foundation, Alexandria, Virginia



Slika 17. Trska (*Phragmites australis* (Cav.) Steud.)



Slika 18. Trska (*Phragmites australis* (Cav.) Steud.) na staništu, Vransko jezero, Dalmacija



Slika 19. Trsasti blještac (*Phalaris arundinacea* L.)



Slika 20. Trsasti blještac (*Phalaris arundinacea* L.) na staništu, dolina rijeke Krapine



Slika 21. Širokolisni rogoz (*Typha latifolia* L.) na staništu, Budinščina



Slika 22. Širokolisni rogoz (*Typha latifolia* L.)



Slika 23. Močvarni ljutak (*Cladium mariscus* (L.) Pohl) na staništu, Plitvička jezera



Slika 24. Kruti šaš (*Carex elata* All.) na staništu, Bedekovčina



Slika 25. Močvarni ljutak (*Cladium mariscus* (L.) Pohl)



Slika 26. Rižasta tajnica (*Leersia oryzoides* (L.) Sw)



Slika 27. Razgranjeni ježinac (*Sparganium erectum* L.)



Slika 28. Žuta perunika (*Iris pseudacorus* L.), okolica Luke, dolina rijeke Krapine



Slika 29. Riječna preslica (*Equisetum fluviatile* L.) na staništu, Plitvička jezera



*Slika 30. Klasasti krocanj
(Myriophyllum spicatum L.)*



*Slika 31. Kanadska vodena kuga
(Elodea canadensis Michx.)*

Tablica 1. Prikaz samoniklih zeljastih vodenih i močvarnih biljnih vrsta Hrvatske koje je moguće koristiti u biljnim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda.

Latinski naziv vrste (Euro+Med PlantBase 2005)	Hrvatski naziv vrste (Domac 1994)	Vodena ili močvarna biljka	Visina biljke (cm) (Tutin et al. 1968-1980, 1993)	Dubina korištena (cm)	Ekološki indeksi (Ellenberg et al. 1991)										Ekološki indeksi (Pignatti et al. 2005)										
					L	T	K	F	R	N	S	L	T	C	U	R	N	S							
<i>Acorus calamus</i> L.	obični idirod	močvarna	15-90		8	5	6	10	7	7	0	8	6	5	10	7	7	0	8	6	5	10	7	7	0
<i>Alisma plantago-aquatica</i> L.	obični žabočun	močvarna	do 100		7	5	X	10	X	8	0	7	X	X	10	X	8	0	7	X	X	10	X	8	0
<i>Azolla filiculoides</i> Lam.	-	vodena	2		6	8	3	11	X	8	0	6	12	5	12	X	8	0	6	12	5	12	X	8	0
<i>Berula erecta</i> (Huds.) Coville	uspravni grešun	močvarna	30-100		8	6	3	10	8	6	1	8	6	4	10	X	7	0	8	6	4	10	X	7	0
<i>Butomus umbellatus</i> L.	štitasti vodojub	močvarna	do 100		6	6	5	10~	X	7	?	6	0	5	10	0	8	0	6	0	5	10	0	8	0
<i>Callitriche hamulata</i> Kütz. ex Koch	jesenska žabovlatka	vodena	20-50		8	4	2	10~	6	4	0	7	7	2	12	2	1	0	7	7	2	12	2	1	0
<i>Callitriche stagnalis</i> Scop.	jezerska žabovlatka	vodena	70-100		7	5	?	10	6	4	1	9	8	5	12	5	1	0	9	8	5	12	5	1	0
<i>Carex acuta</i> L.	nježni šaš	močvarna	30-120(-150)		7	5	7	9=	6	4	0	7	4	7	9	6	4	0	7	4	7	9	6	4	0
<i>Carex acutiformis</i> Ehrh.	močvarni šaš	močvarna	(30-)50-150	152	7	X	3	9~	7	5	0	7	5	5	9	7	5	0	7	5	5	9	7	5	0
<i>Carex buekii</i> Wimm.	šaš	močvarna	40-120		8	6	6	8	8	6	0	6	4	6	10	4	2	0	6	4	6	10	4	2	0
<i>Carex elata</i> All.	kruti šaš	močvarna	20-120	103	8	X	2	10~	X	5	0	8	5	4	10	X	4	0	8	5	4	10	X	4	0
<i>Carex paniculata</i> L.	mešičasti šaš	močvarna	40-100(-150)		7	X	3	9	6	4	0	7	5	4	9	9	4	0	7	5	4	9	9	4	0
<i>Carex riparia</i> Curtis	obalni šaš	močvarna	(30-)50-150		7	6	3	9=	7	4	0	7	5	5	10	6	5	0	7	5	5	10	6	5	0
<i>Carex rostrata</i> Stokes	kljunasti šaš	močvarna	20-100		9	X	X	10	3	3	0	8	4	4	10	4	2	0	8	4	4	10	4	2	0
<i>Carex vesicaria</i> L.	mjehurasti šaš	močvarna	120		7	4	X	9=	6	5	0	7	4	X	9	6	5	0	7	4	X	9	6	5	0
<i>Carex vulpina</i> L.	lisičji šaš	močvarna	30-100	60	9	6	5	8=	X	5	0														
<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	kruta voščika	vodena	30-150		6	7	X	12~	8	8	0														
<i>Ceratophyllum submersum</i> L.	mekana voščika	vodena	20-80		5	8	5	12	8	7	0	5	8	5	12	8	7	0	5	8	5	12	8	7	0
<i>Cladium mariscus</i> (L.) Pohl	močvarni ljutak	močvarna	125-250		9	6	3	10	9	3	0	9	X	5	10	9	3	1	9	X	5	10	9	3	1
<i>Cyperus flavescens</i> L.	žučkasti oštrik	močvarna	1-50		9	6	4	7=	X	4	0	6	6	5	9	5	0	0	6	6	5	9	5	0	0
<i>Cyperus longus</i> L.	dugi oštrik	močvarna	20-150		8	8	3	9=	X	5	0	8	7	5	11	5	0	0	8	7	5	11	5	0	0
<i>Eleocharis palustris</i> (L.) R. Br.	močvarna jezernica	močvarna	do 100		8	X	X	10	X	?	0	8	6	5	10	3	0	0	8	6	5	10	3	0	0
<i>Elodea canadensis</i> Michx.	kanadska vodena kuga	vodena	20-100(-300)		7	6	5	12	7	7	0	6	7	5	12	7	8	0	6	7	5	12	7	8	0
<i>Equisetum fluvatile</i> L.	riječna preslica	močvarna	10-60		8	4	X	10	X	5	0	8	4	X	10	X	6	0	8	4	X	10	X	6	0
<i>Equisetum palustre</i> L.	močvarna preslica	močvarna	30-150	250	7	X	5	8	X	3	0	7	X	5	7	X	3	0	7	X	5	7	X	3	0
<i>Galium palustre</i> L.	cretna bročika	močvarna	(5-)15-70(-80)		6	5	3	9=	X	4	0	7	5	4	8	5	3	0	7	5	4	8	5	3	0
<i>Glyceria fluitans</i> (L.) R. Br.	plivajuća pirevina	močvarna	(20-)40-120(-150)		7	X	3	9=	X	7	0	7	6	5	9	5	0	0	7	6	5	9	5	0	0
<i>Glyceria maxima</i> (Hartm.) Holmb.	velika pirevina	močvarna	(60-)80-200(-250)	95	9	5	X	10~	8	9	0	9	5	5	10	8	7	0	9	5	5	10	8	7	0
<i>Glyceria plicata</i> (Fr.) Fr.	narodana pirevina	močvarna	(30-)40-80(-100)		8	5	3	10~	8	8	0	7	3	5	10	5	0	0	7	3	5	10	5	0	0
<i>Hippuris vulgaris</i> L.	obični borak	močvarna	(4-)30-60(-150)		7	5	X	10	8	X	0	7	6	5	12	8	5	0	7	6	5	12	8	5	0

Latinski naziv vrste (Euro+Med PlantBase 2005)	Hrvatski naziv vrste (Domac 1994)	Vodena ili močvarna biljka	Visina biljke (cm) (Tutin et al. 1968-1980, 1993)	Dubina korijena (cm)	Ekološki indeksi (Ellenberg et al. 1991)										Ekološki indeksi (Pignatti et al. 2005)									
					L	T	K	F	R	N	S	L	T	C	U	R	N	S						
<i>Hottonia palustris</i> L.	močvarna rebratica	vodena	30-90		7	6	5	12	5	4	0	7	6	5	11	5	4	0						
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> L.	žabogriz	vodena	2-10		7	6	4	11	7	6	0	8	8	5	12	7	8	0						
<i>Hydrocotyle vulgaris</i> L.	obični ljepušak	močvarna	do 25	6	7	5	2	9~	3	2	1	9	6	5	9	3	3	0						
<i>Iris pseudacorus</i> L.	žuta perunika	močvarna	60-120		7	6	3	9=	X	7	0	7	7	5	10	6	7	0						
<i>Leersia oryzoides</i> (L.) Sw.	rižasta tajnica	močvarna	do 100		8	6	3	10	8	8	0	8	5	5	10	0	8	0						
<i>Lemna gibba</i> L.	grbasta vodena leća	vodena	7		8	6	3	11	8	8	1	7	6	5	12	7	8	0						
<i>Lemna minor</i> L.	mala vodena leća	vodena	0,1-0,8		7	5	3	11	X	6	1	7	X	5	12	X	X	0						
<i>Lemna trisulca</i> L.	podvodna vodena leća	vodena	0,2-2		7	6	3	12	7	5	1	8	X	5	12	7	6	0						
<i>Ludwigia palustris</i> (L.) Elliott	močvarna mekčina	močvarna	3-50		8	7	3	9=	4	4	0	7	6	5	9	5	6	0						
<i>Lycopodium europaeus</i> L.	obična vučja noga	močvarna	20-120		7	6	5	9=	7	7	0	7	6	5	9	X	7	0						
<i>Lysimachia vulgaris</i> L.	obični protivak	močvarna	50-160	90	6	X	X	8~	X	X	0	7	X	7	9	X	X	0						
<i>Lythrum salicaria</i> L.	purpurna vrbica	močvarna	50-150	95	7	5	5	8~	6	X	1	7	5	5	8	7	X	0						
<i>Marsilea quadrifolia</i> L.	četverolisna razno-rotka	močvarna	7-20		7	9	5	10	7	6	0	9	8	5	10	X	7	0						
<i>Mentha aquatica</i> L.	vodena metvica	močvarna	(10-)20-90		7	5	3	9=	7	5	0	7	5	5	9	7	4	0						
<i>Myriophyllum spicatum</i> L.	klasasti krocanj	vodena	do 300		5	6	X	12	9	7	?	5	X	X	12	8	5	0						
<i>Myriophyllum verticillatum</i> L.	pršljenasti krocanj	vodena	do 300		5	6	5	12	7	8	0	5	6	5	12	6	7	0						
<i>Najas marina</i> L.	morska podvodnica	vodena	5-45		9	5	4	12	9	6	1	5	8	2	12	7	6	1						
<i>Nasturtium officinale</i> (L.) R. Br.	ljekovita potočarika	močvarna	10-100		7	X	3	10	7	7	0	7	4	5	11	7	7	0						
<i>Nuphar lutea</i> (L.) Sm.	žuti lokvanj	vodena	do 10		8	6	4	11	7	6	0	8	X	5	12	6	X	0						
<i>Nymphaea alba</i> L.	bijeli lopoč	vodena	50-200		8	6	3	11	7	5	0	8	X	5	12	7	7	0						
<i>Oenanthe aquatica</i> (L.) Poir.	vodena trbulja	močvarna	do 150		7	6	5	10	7	6	0	7	6	5	10	7	5	0						
<i>Phalaris arundinacea</i> L.	trstasti blještac	močvarna	do 200	139	7	5	X	9=	7	7	0	7	X	X	8	7	7	0						
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Steud.	trska	močvarna	80-350(-1000)		7	5	X	10	7	7	0	7	5	X	10	7	5	1						
<i>Polygonum amphibium</i> L.	rahlucvjetni kačun	močvarna	5-40	60	7	6	X	11	6	4	0	7	X	X	11	X	7	0						
<i>Potamogeton natans</i> L.	plivajući mrijesnjak	vodena	30-90		6	5	5	11	7	5	0	6	4	5	12	7	4	0						
<i>Potamogeton nodosus</i> Poir.	plutajući mrijesnjak	vodena	do 300		6	6	5	12	8	5	0	6	6	5	12	7	6	0						
<i>Potamogeton pectinatus</i> L.	češnjasti mrijesnjak	vodena	do 230		6	X	5	12	8	8	1	6	0	5	12	7	5	1						
<i>Potamogeton perfoliatus</i> L.	prorasli mrijesnjak	vodena	2-11		6	X	X	12	7	6	1	6	0	0	12	7	4	0						
<i>Potamogeton pusillus</i> L.	maleni mrijesnjak	vodena	15-80		6	5	5	12	6	X	1	6	5	5	12	7	8	0						
<i>Ranunculus fluitans</i> Lam.	podvodni žabnjak	vodena	60-200		8	6	2	12	X	8	0	8	6	4	12	X	8	0						
<i>Ranunculus trichophyllus</i> Chaix	tankolisni žabnjak	vodena	30-80		7	X	X	12	8	7	0	7	X	X	12	X	X	1						

Latinski naziv vrste (Euro+Med PlantBase 2005)	Hrvatski naziv vrste (Domac 1994)	Vodena ili močvarna biljka	Visina biljke (cm) (Tutin et al. 1968-1980, 1993)	Dubina korijena (cm)	Ekološki indeksi (Ellenberg et al. 1991)										Ekološki indeksi (Pignatti et al. 2005)									
					L	T	K	F	R	N	S	L	T	C	U	R	N	S						
<i>Rorippa amphibia</i> (L.) Besser	amfibijski grbak	močvarna	40-120		7	6	7	10	7	8	0	7	5	7	10	7	8	0						
<i>Sagittaria sagittifolia</i> L.	obična strelica	močvarna	30-100		7	6	4	10	7	6	0	7	0	5	10	7	6	0						
<i>Salvinia natans</i> (L.) All.	plivajuća nepačeka	vodena	8-20		7	8	5	11	7	7	0	8	6	5	4	8	7	0						
<i>Scirpus lacustris</i> L.	jezerski oblič	močvarna	do 300		8	6	3	11	7	6	1	8	5	5	11	7	5	0						
<i>Scirpus litoralis</i> Schrad.	obalni oblič	močvarna	30-200									9	8	4	10	6	6	1						
<i>Scirpus maritimus</i> L.	primorski ranić	močvarna	30-120		8	6	X	10	8	7	2	8	X	4	10	8	5	2						
<i>Scirpus tabernaemontani</i> C. C. Gmel.	sivi oblič	močvarna	do 150		8	7	6	10	7	8	0	8	7	6	10	8	x	1						
<i>Sparganium erectum</i> L.	razgranjeni ježinac	močvarna	(30-)50-150(-200)		7	6	5	10	7	7	0	7	6	5	10	X	5	0						
<i>Spirodela polyrrhiza</i> (L.) Schleid.	višekorjenska bar-ska leća	vodena	4-10		7	6	5	11	6	6	1	7	6	5	12	X	7	0						
<i>Siratiotes aloides</i> L.	rezac	vodena	15-50		7	6	5	11	8	6	0	7	7	5	12	7	8	0						
<i>Trapa natans</i> L.	vodeni orašac	vodena	50-200		8	7	5	11	6	8	0	8	7	5	12	6	8	0						
<i>Typha angustifolia</i> L.	uskolinski rogoz	močvarna	do 200		8	7	5	10	7	7	1	8	7	5	10	X	7	0						
<i>Typha latifolia</i> L.	širokolinski rogoz	močvarna	200 ili više		8	6	5	10	7	8	1	8	6	5	10	X	8	0						
<i>Typha minima</i> Hoppe	patuljasti rogoz	močvarna	25-75		8	X	7	9=	8	2	0	8	0	7	9	8	2	0						
<i>Utricularia vulgaris</i> L.	obična mješimka	vodena	do 100		7	6	X	12	5	4	0	7	6	X	12	6	6	0						
<i>Vallisneria spiralis</i> L.	uvijuša	vodena	do 40		7	8	3	12	7	7	0	6	5	5	12	5	5	0						
<i>Veronica beccabunga</i> L.	potočna čestoslavica	močvarna	10-70		7	X	3	10	7	6	0	7	X	5	10	7	6	0						
<i>Wolffia arrhiza</i> (L.) Wimm.	beskorjenska sitna leća	vodena	do 15		7	6	5	11	7	6	0	7	6	5	12	3	2	0						
<i>Zannichellia palustris</i> L.	žabokrečina	vodena	20-40		6	6	5	12	8	8	5	6	0	2	12	7	6	1						

SEISMIC MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF VIBRATION INTENSITY CAUSED BY BLASTING IN "GOVRLEVO" MINEFIELD, MACEDONIA

SEIZMIČKA MJERENJA I ANALIZA INTENZITETA VIBRACIJA IZAZVANIH MINIRANJEM U RUDNIKU „GOVRLEVO“, MAKEDONIJA

Zoran Milutinovic^{1*}, Radmila Šalić¹, Daniel Tomić¹, Goce Bogdanovski²

¹ Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), 165 Todor Aleksandrov Str., P.O. Box 101, 1000, Skopje, Macedonia

² Titan Cementarnica Usje AD, 94 Boris Trajkovski Str., 1000, Skopje, Macedonia

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: zoran@pluto.iziis.ukim.edu.mk

Abstract: The performed investigations involved measurement of seismic impacts induced by blasting (an explosion) in a minefield located within the concession borders of the limestone mine "Govrlevo"; processing, analysis and interpretation of the records, determination of vibration intensities and evaluation of their potential harmful effects upon people and material property in accordance with the current legal regulations and standards. Since the normative framework of Macedonia inadequately cover the considered field, measurements and their interpretation were done in compliance with DIN 4150-3: 1993 and BS 6472-2: 2006 standards, and WAC 296-52-67065, USBM: RI 8507 and OSMRE: CFR Part 816.67 (D) Rules and Recommendations.

Keywords: Seismic measurements, vibrations, minefield, blasting, damage, discomfort, Govrlevo, Macedonia

Sažetak: Izvršena istraživanja obuhvaćaju instrumentalna mjerenja oscilacija seizmičkih udara prouzrokovanih eksplozijom minskog polja lociranog u krugu površinskog rudnika krečnjaka „Govrlevo“, obradu i analizu izmjerenih oscilacija seizmičkih udara, određivanje intenziteta vibracija i ocjenu, suglasno aktualnoj zakonskoj regulativi i standardima, njihovih potencijalno štetnih utjecaja na ljude i materijalna dobra. Obzirom da nacionalna regulativa Makedonije neadekvatno pokriva predmetno područje, mjerenja i njihova interpretacija su izvršena suglasno DIN 4150-3:1993 i BS 6472-2:2006 standardima, odnosno pravilnicima i preporukama WAC 296-52-67065, USBM:RI 8507 i OSMRE:CFR Deo 816.67(D).

Gljučne riječi: Seizmička mjerenja, vibracija, rudnik, miniranje, oštećenje, neugodnost, Govrlevo, Makedonija

Received: 16.05.2016 / Accepted: 18.06.2016

Published online: 04.07.2016

Pregledni rad / Review paper

1. INTRODUCTION

The seismic measurements at Govrlevo mine, i.e., definition of vibration intensity and evaluation of its potentially harmful effect upon people and material property were performed in accordance with the requirements arising from the Integrated Environmental Permit "B". At the request of the joint stock company TITAN, cement factory "Usje", the Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Ss. Cyril and Methodius University, Skopje (UKIM-IZIIS, Skopje) performed:

- Seismic measurements of seismic effects caused by blasting in the minefield located within the surface limestone mine Govrlevo (2.07.2014);
- Processing and analysis of the records obtained; and,
- Definition of intensity of vibrations for evaluating their potential adverse effects upon people and material property in compliance with the currently valid legal regulations and standards.

Since the national regulations very inappropriately cover the subject area, the quantification and evaluation of the effect of the vibrations induced by explosions

upon people and material property, the measurements and their interpretation were done in conformity with the DIN 4150-3:1993 and BS 6472-2:2006 standards, i.e., the WAC 296-52-67065, USBM: RI 8507 and OSMRE: CFR Part 816.67(D) rulebooks and recommendations.

2. REGULATORY FRAMEWORK FOR EVALUATING EFFECTS OF EXPLOSION INDUCED VIBRATIONS

2.1. National Normative Framework

The minimum requirements for protection of employees against risks related to their health and safety which are possible to occur due to exposure to mechanical vibrations and are exclusively applied for activities during which employees are exposed or are potentially exposed to risks related to mechanical vibrations during their work are defined in the "Rulebook on Safety and Health at Work of Employees Exposed to Risks Related to Mechanical Vibrations" (Official Gazette of RM no. 26/2008), based

on Article 47 of the Law on Safety and Health at Work (Official Gazette of RM no. 92/07).

The Rulebook (Official Gazette of RM no. 26/2008) is focused on two specific risks related to health and safety of employees, namely:

- “Hand - arm vibration”: mechanical vibration which, when transferred through the human hand – arm system, causes risks related to health and safety of employees, particularly vascular, bone or joint, neurological or muscular disorders;
- “Vibrations of the entire body”: mechanical vibration which, when transferred through the entire body, causes risks related to health and safety of employees, particularly numbness of the lower back and spine damage.

Appendix A to the Rulebook (Official Gazette of RM no. 26/2008) regulates to details the evaluation of the exposure, the procedure of measurement of vibrations and the methodological aspects of evaluation of the stated risks related to health and safety of employees. The adopted criteria on the level of exposure and risk level in the Rulebook are taken from:

- ISO 5349-1:2001 (chapters 4 and 5 and Appendix A) on hand-arm vibrations, and,
- ISO 2631-1:1997 (chapters 5, 6 and 7, Appendices A and B) on vibration of the entire body.

The exposure to explosions and related phenomena (vibration and impact wave) are instant (impact) phenomena and last up to several seconds at the most.

The discussed current national regulations in this field are not relevant for evaluation of the level of exposure and risk related to vibrations and impact wave caused by explosions taking into account that:

- The Rulebook (Official Gazette of RM no. 26/2008) that regulates safety and health at work contextually does not correspond and cannot be applied in the field of evaluation of the level of exposure and risk due to vibrations and impact wave caused by explosions;
- The character, the time duration (maximum several seconds) and the frequency content of the vibrations caused by explosion radically deviate from the characteristics of vibrations and noise to which employees are exposed during the 8 hour working day; and,
- ISO and BS criteria defined for another field are not adequate to be applied in the field of evaluation of the level of exposure and risk due to vibrations and impact wave (air overpressure) caused by explosion.

The Law on Environment (Official Gazette of RM no. 53/2005, 81/2005 and 24/2007) based on the provisions of the 96/61 EU Directive on Integrated Pollution Prevention and Control also treats vibrations as pollutants in addition to processes connected with emission of chemical agents and noise, but there is not a single bylaw act that prescribes a methodology for their analysis and necessary benchmarks.

2.2. International Normative Framework

For relevant qualitative and quantitative interpretation of the measured vibrations and their effect upon people and structures, ample analysis and synthesis of international standards (ISO) and relevant national rulebooks and instructions regulating the considered field and defining quantitative criteria were performed to evaluate:

- Damage to structures; and,
- Human sensitivity to and perception of different kinds of long- and short- term vibrations and vibrations caused by explosions.

Irrespective of the type, the character and the time duration of the vibrations (long term /vibrations due to activities on construction sites/, short term /passing of vehicles on tracks and alike/, instant /explosion/), the quantitative criteria of the standards are based on:

- maximum (ppD, ppV), i.e., mean square (rmsD, rmsV) values of displacement (D) and velocity(V), respectively; and,
- Amplitude frequency spectra of the vibration velocity of the soil particles.

The stated physical quantities were identified, adopted and quantitatively expressed as parameters that have an exclusive control over the processes of damage to structures and human sensitivity to and perception of vibrations.

2.2.1. Risk Related to Damage of Structures due to Vibrations

DIN 4150-3:1999 and BS 7385-2:1995 also include vibrations due to explosions. The dominant part of the empirical basis of the defined criteria (benchmarks) are the effects of short term vibrations upon the potential for damage to structures as well as human sensitivity to and perception of these vibrations.

Competent standards for evaluation of the effect of vibrations due to explosions are incorporated in WAC (Washington Administrative Code) 296-52-67065, Chapter 296-52: Safety Standards for Possession, Handling, and Use of Explosives, Part: 67065. The bases of WAC 296-52-67065 are the investigations published in the following reports: USBM: RI 8507 (U.S. Bureau of Mines, Report: RI 8507, “Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting” 1980) and OSMRE (U.S. Office of Surface Mining and Reclamation Enforcement) normative: CFR (Code of Federal Regulations), Part 816.67(D) 1983).

3. MEASUREMENT AND ANALYSIS OF SEISMIC EFFECTS CAUSED BY EXPLOSION IN A MINE FIELD

Modern practice of measurement of vibrations due to explosions anticipates measurement of ppV by seismometers, i.e., velocity transducers – sensors for measurement of vibration velocity. The minimal requirements that the equipment for measurement of explosion vibrations (BS 6472-2:2008) should satisfy are:

an amplitude range of 0.0001 m/s (0.1 mm/s) to 0.1 m/s (100 mm/s) in the entire frequency range of 4.5–250 Hz. While seismometers are the most frequently used instruments since they directly measure the necessary parameter (velocity), BS 6472-2:2008 also allows application of other types of instruments (accelerometers) provided that velocities with stable and reliable characteristics in the necessary frequency range are obtained with the processing of the data from the measurements.

The preferred technique of measurement is that with which reliable unfiltered (raw) time histories of acceleration are obtained to evaluate the human exposure, i.e., velocity and acceleration for evaluation of exposure of structures from which the necessary physical quantities are analytically obtained (ISO 2631-2:1989 Part 3.5).

The length (time duration) of the measurement of vibrations, the dynamic range of the instrument and the frequency (or the velocity) of sampling (sampling frequency – number of readings in a unit of time) should provide a satisfying statistic preciseness and enable that the sample (the time history of the necessary parameter) be “typical” for the type of exposure (of people or structures) for which the evaluation is performed (ISO 2631-1:1997(E) parts 5.4 and 5.5).

3.1. Geotechnical Medium of Surface Excavation

The blasting of the limestone in Govrlevo mine was done in three lithophysical media (surface cracked rocks /Mp/, more compact cracked rocks /Mi/ and relatively compact rocks /Mr/) with the following interval seismic velocities (Mirakovski & Aleksovski 2002), Table 1:

Table 1. Lithophysical media of Govrlevo mine

Limestone medium	Density ρv (kNs/m ⁴)	Seismic velocities	
		V_p (m/s)	V_s (m/s)
Mp	20.0 - 22.0	750 - 1 350	400 - 750
Mi	22.0 - 24.0	1 350 - 2 400	450 - 1 350
Mr	24.0 - 26.5	2 950 - 4 150	1 150 - 2 150

Source: Mirakovski & Aleksovski (2002)



Figure 1. Disposition of the minefield

3.2. Main Parameters of Minefield and Blasting

The main blasting parameters are presented in Table 2. The general disposition of the minefield is depicted in Figure 1.

Table 2. Main Blasting Parameters

Blasting parameter	Value
Number of boreholes:	39
Number of rows:	5
Charges per borehole Qm (kg):	73
Total charge Q (kg):	2,850
Mode of activation:	NON-EL system with millisecond (ms) delay 36 pcs. (17, 25, 42 ms)

3.3. Disposition of Measuring Points, Measurement and Recording of Seismic Vibrations

The disposition of the seismic measuring points (SMP) and the disposition of the shallow refraction geophysical profile (PT-KT) are shown in Figure 2.

3.4. Disposition of Measuring Points, Measurement and Recording of Seismic Vibrations

The disposition of the seismic measuring points (SMP) and the disposition of the shallow refraction geophysical profile (GPSP-GPEP) are shown in Figure 2.

3.5. Processing and Analysis of Records

The processing of the recorded time histories of the vibration velocity of soil particles was carried out in accordance with DIN 44150 3:1990-2:

- Definition of the maximum (peak) velocity [$ppV = maxVr$] of the recorded time history of velocity [$vr(t)$] and the time at which it occurs [$TmaxVr$];
- Extraction of the signal segment with a length To that contains the vibrations due to the explosion [$ve(t)$] and is symmetrically centred around the time of the peak [$TmaxVr-To/2, TmaxVr+To/2$];
- Multiplication of the extracted signal by the time displaced Hanning window with a length To , centered around the peak time $TmaxVr$:

$$h_w(t) = \begin{cases} \frac{\left(1 - \cos\left[\frac{2\pi(t-t_0)}{T_0}\right]\right)}{2} & \text{for } t_0 \leq T_0 \leq T_0 + t_0 \\ 0 & \text{for } t_0 \leq T_0 \leq T_0 + t_0 \end{cases}$$

- Computation of the velocity amplitude spectra over the frequency range characteristic for the type of exposure for which the evaluation is made (human perception and reaction, i.e., risk related to damage to structures) were computed;

- Integration of $ve(t)$ signal (velocities) for obtaining the $de(t)$ (displacement) signal and calculation of the maximum (peak) displacements [$ppD = maxDe$];
- To the $de(t)$ amplitude spectra is not given importance considering that it not anticipated by the requirements contained in the standards for evaluation of risk related to damage to structures exposed to the effect of transient vibrations and vibrations caused by explosions.

All processing and analyses are made by inhaus developed Matlab software package (Milutinović & Šalić 2014).

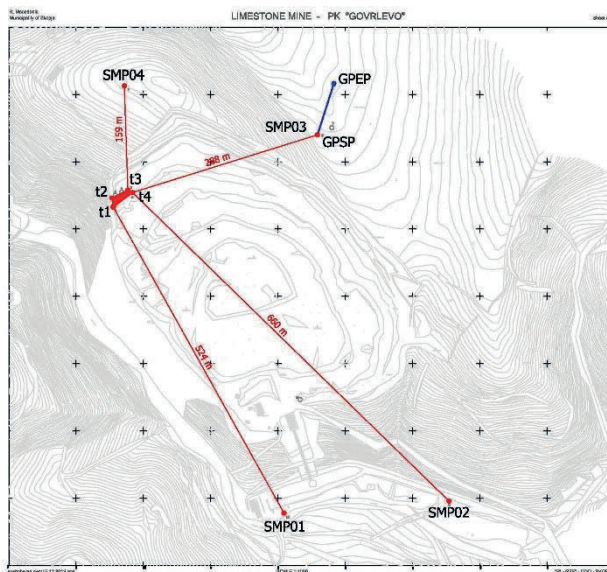


Figure 2. Disposition of seismic measuring points (SMP01-04) and geophysical profile GFSP-GFEP in respect to the minefield.

Lithophysical media	Vp [m/s]	Vs [m/s]	γ^* (kN/m ³)	Depth H[m]	Period T[s]
D – Quaternary cover with admixtures of crushed bedrock at the base	400-600	150-240	17.0	4-8	0.07-0.08
Mi – Cracked limestone	1,550-2,000	700-1,000	20.0-22.0	4-15	0.12-0.17
Mr – Relatively compact limestone	2,500-2,800	1,400-1,500	24.0-26.5	15+	~ 0.2

*Source: Mirakovski & Aleksovski (2002)

The blasting vibrations in Govrlevo mine were measured by:

- a set of 4 ultramobile triaxial TROMINO™, MICROMED, Italy, seismometers,
- one uniaxial SS-1 Ranger (Kinometrics, Pasadena, USA) seismometer, and
- a set of 4 Guralp CMG-5DT (Guralp Systems Ltd., Reading, UK) accelerometers.

- SoilSpy Rosina™, MICROMED, Italy, 16 channel digital seismograph was used for shallow refraction geophysical prospection.

The equipment used fulfils the BS 6472-2:2008 requirements.

4. RESULTS

4.1. Seismogeological Characteristics of Measuring Point SMP03

Shallow seismic refraction was performed along a seismic refraction profile with a length of 80 metres, in the direction of the Govrlevo surface excavation - Structures in the village of Dolno Sonje. Geophysical prospection were performed for getting a general insight into the characteristics of the potential amplitude-frequency modification and amplification potential of seismic vibrations due to blasting in relation to the local seismogeological characteristics of the terrain.

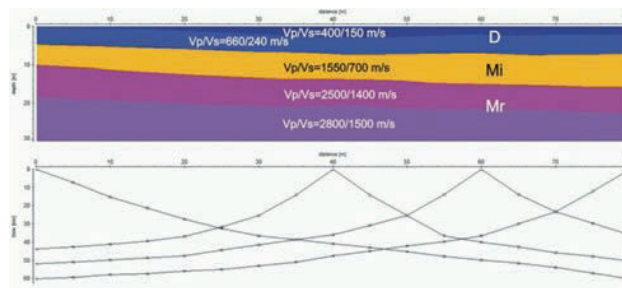


Figure 3. Lithostratigraphic/lithophysical characteristics of the researched geophysical profile

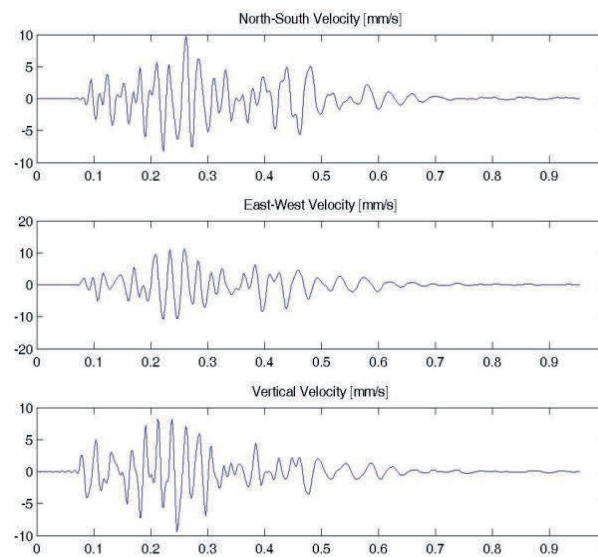


Figure 4. Measuring point SMP03: Time history of velocity[ve(t)]

The lithophysical and lithostratigraphic structure of the terrain along the investigated profile is presented in Figure 3. The obtained results fit well with the results from the investigations performed in 2002 and 2003 (Mirakovski & Aleksovski 2002, 2003), Table 3.

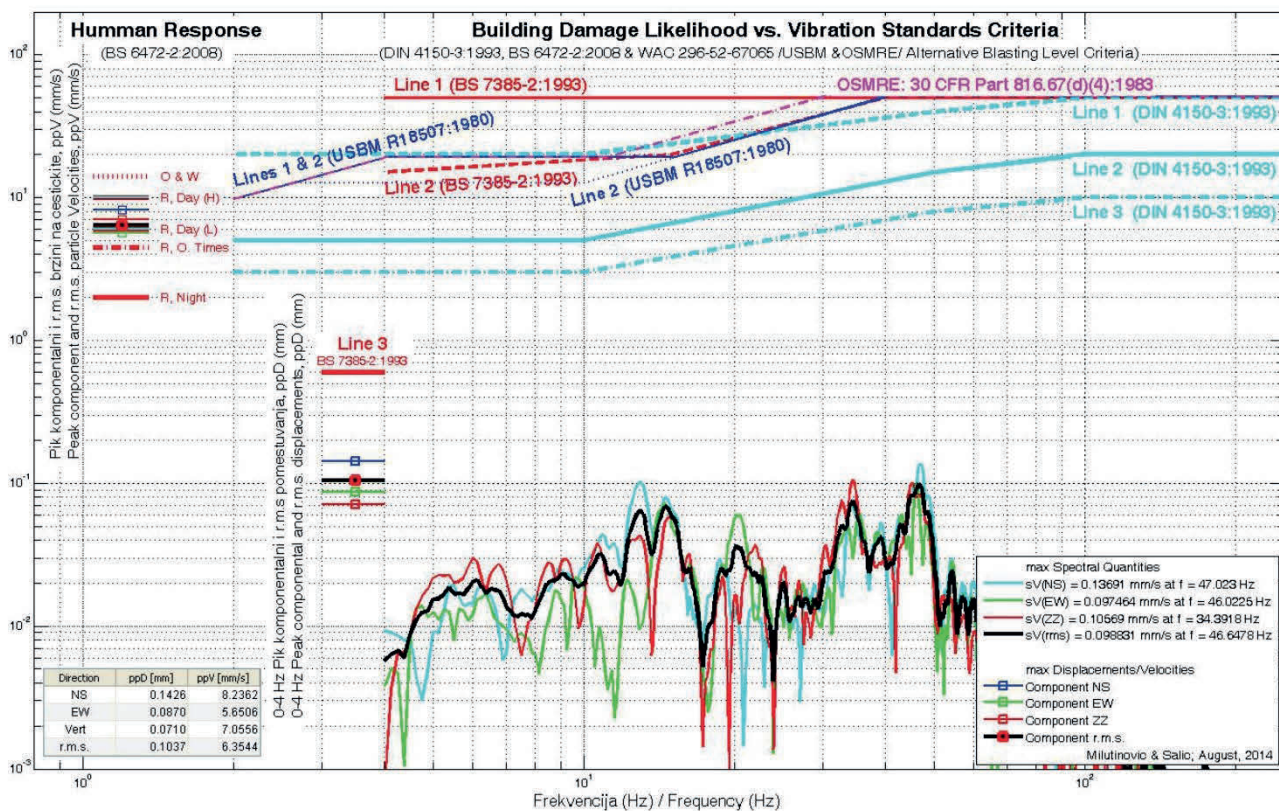


Figure 5. Comparative frequency graph, measurement point SMP02 (660m from the minefield)

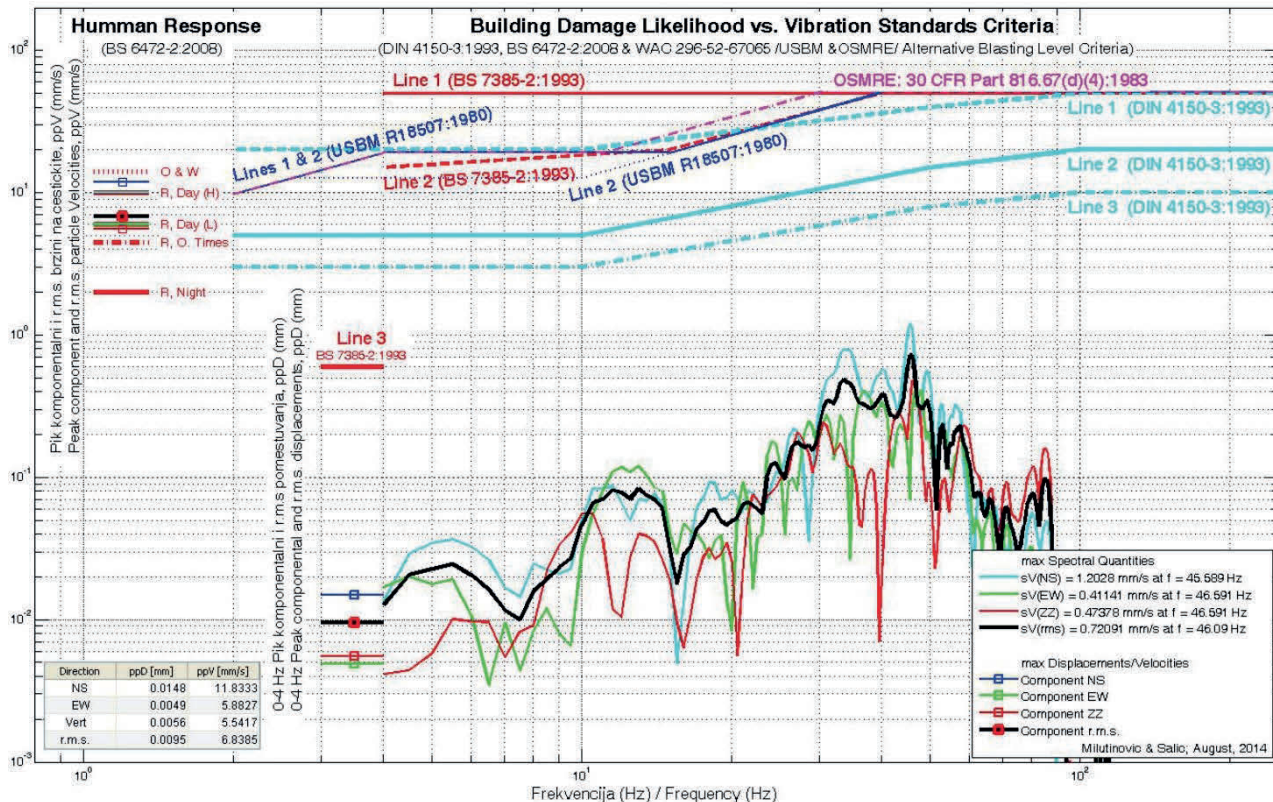


Figure 5. Comparative frequency graph, measurement point SMP04 (159m from the minefield)

The seismogeological characteristics of the other seismic measuring points were not defined considering that these are located on a rock outcrop as well as that they are within the limits of Govrlevo mine concession area.

For the measuring points SMP02 and SMP03, topographically located on a thin quaternary diluvium in the transit zone between the exploited rock massif and a valley, there is an indication for development of a secondary seismic wave (**Figure 4**) due to:

- the complex geometry of the geological structure, and,
- presence of a relatively thin quaternary layer.

Due to the closeness of the measuring points to the hilly massif, the secondary wave could not develop completely so that its amplitudes were smaller than the amplitudes of the primary wave. However, at greater distances from the hilly massif and in conditions of a thicker quaternary layer, it can be amplified and exceed the amplitudes of the primary wave.

To understand and interpret this effect completely, during the next blasting, particularly if blasting with a total charge weight greater than 2,850 kg is planned, at least one measuring point should be established in the direction leading to v. Dolno Sonje, at minimum 500-800 m from the measuring point SMP03. For this, it is necessary to define the seismogeological and stratigraphic characteristics by shallow refraction geophysical prospecting.

4.2. Risk Related to Damage to Structures and Human Discomfort

The level of risk related to occurrence of cosmetic damage to structures and human discomfort causing complaints by the population, the measured (BS 6472-2:2008, ISO 2631-1:1997) and analytically processed (DIN 44150 3:1990-2) time histories of velocity were compared with the benchmark values prescribed by the DIN 4150-3:1999, BS 7385-2:1995 and OSMRE CFR Part 816.67(D) standards and the USBM: RI 8507 (WAC 296-52-67065) instructions.

Comparative summary graphs and synthesis of fulfilment/unfulfilment of the criteria for the four measuring points (SMP01, SMP02, SMP03 and SMP04) were elaborated and presented in details (Milutinović & Šalić 2014).

A typical comparative spectral graphs for SMP02 (thin diluvium, 660m from the minefield) and SMP04 (rockoutcrop, 159m from the minefield) are shown in Figs. 5 and 6 respectively. Both graphs, as well as other two not presented, show that, in addition to the fulfilment of the relevant standards and recommendations of BS 7385-2:1995 and OSMRE CFR Part 816.67(D) and USBM: RI 8507 (WAC 296-52-67065) instructions [norms relevant for vibrations due to explosions], there is also fulfilment of the DIN 4150-3:1999 standard, which is most frequently used in the EU and, at the same time, is the most conservative standard being based on empirical data from "transient" vibrations.

5. CONCLUSIONS

Based on the comprehensive investigations that arose from the considered analyses and investigations in the domain of legal regulatory framework, the following conclusions are drawn:

1. The national regulatory framework of the Republic of Macedonia inappropriately covers the considered field – in particular the quantification and evaluation of effects of vibrations caused by explosions upon people and man-made property;
2. The measurements, the analysis of data and the interpretation of the obtained results were done according to the following valid international standards and norms: DIN 4150 3:1993, BS 6472-2:2006, BS 5228-2:2009 и BS 7385-2:1993 standards, i.e., rulebooks and norms WAC 296-52-6706, USBM:RI 8507 and OSMRE:CFR Part 816.67(D);
3. Based on the results from the measurements and analysis of the level of vibrations emitted by blasting at the Govrlevo mine done on 2.07.2014 with an explosive charge of 2,850 kg, (Table 4), it is concluded that:
 - The intensity of vibrations emitted from the blasting at all measuring points (SMP01, SMP02, SMP03 and SMP04) was considerably below the benchmark values that may cause cosmetic damage to structures, cf: DIN 4150 3:1993, BS 7385-2:1993, WAC 296-52-67065, USBM:RI 8507 and OSMRE:CFR Part 816.67(D);
 - The intensity of vibrations emitted from blasting at all measuring points (SMP01, SMP02, SMP03 and SMP04) were below the level of perception that may cause complaints by the users of administrative and industrial structures, cf: BS6472-2:2008, BS 5228-2:2009, J&S 02-039;
 - The intensity of vibrations measured at measuring points SMP03 and SMP04 was greater than the benchmark values that may cause human discomfort – a level that will cause complaints by the users of residential structures. The unfulfilment of this criterion should be neglected considering that there are no residential structures within the concession limits of Govrlevo mine, cf: BS 6472-2:2008, BS 5228-2:2009, J&S 02-039;
 - The blast wave and the accompanying sound effects were not felt and should be treated as atypical for explosive charges of up to 2,850 kg.
4. The measured and interpreted effects of vibrations due to blasting within the limits of the concession area were considerably below the ultimate (allowed) values and other benchmark indicators prescribed by the implemented standards;
5. The blasting carried out on 02.07.2014 12h35 with an explosive charge of 2,850 kg, within the concession area of Govrlevo mine did not cause vibration and/or accompanying effects that would have any effect upon the environment and the structures and would not cause any human discomfort (**Table 4**);

6. Within the limits of the concession area of Govrlevo mine, the vibrations due to production blasting with explosive charges of up to 2,850 kg., activated by a NON-EL system with millisecond delay, at distances of 150+ metres do not pose any risk related to damage to structures or causing human discomfort.

Table 4. Risk related to damage to structures and human discomfort (Govrlevo, 02.07.2014)

Measured parameters/criteria for risk related to damage to structures and human discomfort	Seismic measuring point			
	SMP 01	SMP 02	SMP 03	SMP 04
A. Measured quantities				
Distance to the mine field [m]	523.64	659.65	288.03	158.99
maxppD [NS, EW, ZZ, rms] (1-4 Hz) [mm]	0.0098	0.1426	0.0151	0.0148
maxppV [NS, EW, ZZ, rms]	1.9609	8.2362	11.3355	11.8333
B. Risk related to occurrence of cosmetic damage				
OSMRE CFR part 816.67(D),1983 ppV = 25.4[mm/s]for distances: 91.5 – 1,525 m	√	√	√	√
BS 7585-2:1993 (BS 5228-2:2009) Line 3: maxppD(1-4 Hz) = 0.6 [mm]	√	√	√	√
1-100 (250) Hz ppV amplitude spectra				
USBM:RI 8507: RI 8507, 1980; Line 1 and Line 2	√	√	√	√
OSMRE CFR part 816.67(D),1983	√	√	√	√
BS 7385-2:1993 (ISO 4866:1990); Line 1 and Line 2	√	√	√	√
DIN 4150-3:1999; Line 1, Line 2 and Line 3	√	√	√	√
C. Risk related to human discomfort				
BS 6472-2:2008, Administration, workshops, industry At any time: ppV = 14.0[mm/s]	√	√	√	√
BS 6472-2:2008,Housing; Day:ppV = 6-10[mm/s] ¹	√	√	No	No
BS 5228-2:2009, Sensitivity to vibrations	Level 4	Level 4	Level 4	Level 4

√ - Criteria satisfied, No – DOES NOT satisfied

6. RECOMMENDATIONS

6.1. Specific

1. The measurements at measuring points SMP02 and SMP03, both located on a thin quaternary diluvium, topographically situated in the transit zone between the rock massif that is exploited and a valley, point to a potential of development of a secondary seismic wave (Figure 4).

- The measured amplitudes of the secondary wave are smaller than the amplitudes of the primary wave since it could not develop considering that both measuring points are located at the contact zone between the hilly massif and the valley. At greater distances from the hilly massif, in conditions of thicker quaternary deposit and under the effect of blasting with heavier charges, these can be amplified and exceed the amplitudes of the primary wave.
- To completely clarify this effect, during next blasts, in particular if blasting with charges heavier than 2,850 kg is planned, there should be at least one measuring point at min. 500-800 m from the measuring point SMP03, in the direction of the village of Dolno Sonje. For this, it is necessary to define the seismogeological and lithostratigraphic characteristics by shallow geophysical refraction prospecting.

6.2. Strategic

- The current national regulatory framework of Macedonia exclusively treat the work-place exposure and the minimal requirements for protection of employees against work-place risks related to their health and safety that are incurred or are possible to be incurred due to exposure to mechanical vibrations emitted during activities in which the employees are exposed or there is a possibility to be exposed to risks due to mechanical vibrations.
- These are defined in the “Rulebook on Safety and Health at Work of Employees Exposed to Risk Related to Mechanical Vibrations” (Official Gazette of RM no. 26/2008) prepared as a by-law act of the “Law on Safety and Health at Work” (Article 47, Official Gazette of RM no. 92/07). The Rulebook is exclusively focused on two specific risks related to health and safety of employees: (1) “hand – arm vibration”, and (2) “vibrations of the entire body”.
- The national regulations based on the ISO 2631 set of standards, ISO 5349 and ISO 8041 standards and IEC 61260:1995 filtering techniques are not relevant for evaluation of the level of exposure and risk related to long term (vibrations due to activities on construction sites), short term (passing of vehicles on tracks and alike) and instant (explosion and impact wave) vibrations.
- In accordance with the above, the studies in the field of evaluation of the level of exposure and risk related to vibrations and air blow caused by explosions that have been done so far and have been reported to have been performed in accordance with the recommendations and the criteria pertaining to ISO 2631, ISO 5349 and ISO 8041 standards should be treated as contextually

¹According to the Minerals Planning Guidance Note MPG 9 and the memorandum of the Scottish Government no. 26/1992, the measured ppV values should be within the frames of the statistically obtained ultimate

values, but should not exceed the value of 12 mm/s. Accordingly, the level of risk related to human discomfort that could lead to complaints of the population evaluated by NO (unacceptable) could be reduced to an acceptable (√) level.

inadequate, while the presented defined estimates of the risk should be treated as irrelevant.

5. The previous conclusion also holds for all other types of investigations that are not based upon relevant standards in the field considering that they are based on parameters that are not correlated with the statistically quantified and internationally accepted criteria related to risk (benchmark values of velocity and displacement and spectral frequency content at certain levels of damage to structures, i.e., human sensitivity and perception). This is particularly true when the risks from blast induced vibrations are evaluated based on criteria developed for macroseismic estimation of seismic intensity (S.V Medvedev, 1962, MSK 1976 scale, similar).
6. Economic entities, i.e., operators of installations that perform activities contained in Appendix 1 of the Ordinance on Definition of Activities within Installations for Which Integrated Environmental Permit is issued and connected with emission of long term, short term and instant vibrations, in cooperation with and under the auspices of competent ministries and professional associations, should launch a coordinated initiative for establishment of a national normative framework and corresponding by-law acts regulating and prescribing:
 - Technology and instruments' characteristics for measurement of long, short and instant vibrations;
 - Measurement data processing and related analytical techniques;
 - Techniques and procedures for quantification and interpretation of potential effects as well as definition of the risk benchmarks related to the damages of the environment, structures and human discomfort.

Postulates, prescriptions and benchmarks of the recommended regulatory framework shall be based on a multi-faceted analysis and synthesis of existing international standards and national rulebooks in the field (of the countries where this field is normatively regulated), national experience and blasts' (and other vibrations) data available in the Republic of Macedonia and internationally.
7. Until the national normative framework is developed and enforced, authors suggest implementation of DIN4150-3:1999-2 criteria. As the most conservative standard in the field it is most frequently used in the region (for example, [Strelec et al. 2012](#)), and worldwide.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

The work and related research was funded by the Titan Cementarnica Usje AD, Skopje, Macedonia through the "Seismic measurements during blasting in surface limestone minefield 'Govrlevo' in accordance with B integrated environmental license requirements" project.

The authors highly acknowledge for the funding provided as well as authorization for reporting the research postulates and the part of the results achieved.

8. REFERENCES

- DIN 4150-3:1999-2 Structural Vibration, Part 3: Effects of Vibration on Structures. Deutsches Institut für Normung V., Berlin.
- Law on Environment. (Official Gazette of RM no. 53/2005, 81/2005 and 24/2007).
- Law on Safety and Health at Work (Official Gazette of RM no. 92/2007).
- IEC 61260:1995 Electroacoustics - Octave-band and Fractional-octave Band Filters. International Organization for Standardization (ISO), Geneva.
- Medvedev, S. V. 1962: "Inzhenernaya seismologhia". Moscow: Gosstroyizdat.
- Mirakovski G and D. Aleksovski (2002). Report on Seismic Effect of Blasting in the Govrlevo quarry on the location of St. Tryphun Monastery – Skopje, IZIIS Report 2002-19, April 2002.
- Mirakovski, G. and D. Aleksovski (2003). Report on Seismic Effect on Location of St. Tryphun Monastery due to Trial NON-EL Blasting in Govrlevo, IZIIS Report 2003-24, June 2003.
- Milutinović, Z. and R. Šalić (2014). Seismic Measurements and Quantitative Analysis of Intensity of Vibrations Caused by Blasting in Govrlevo Surface Limestone Mine, IZIIS Report 2014-39.
- Milutinović, Z. and R. Šalić (2014). Comparative Analysis and Synthesis of International Standards and Rulebooks on Safety of Structures and Their Users Against Continuous, Temporary and Transient Soil Vibrations (preliminary title), IZIIS 2014-42 (in preparation).
- Rulebook on Safety and Health at Work of Employees Exposed to Risk Related to Mechanical Vibrations (Official Gazette of RM no. 26/2008).
- Strelec, S., D. Smrečki and J. Jug (2012). Study of Seismic Effects due to Blasting in the Shpica and Ljubeshchici Quarries (during production blasting 18.06.2012.). University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering, July 2012.

THE CONCEPT OF SUSTAINABLE IRRIGATION ON THE EXAMPLE OF FOOTBALL FIELD OF F.C. "OBREŠ", SVETI ILIJA, CROATIA

KONCEPT ODRŽIVOG NAVODNJAVANJA NA PRIMJERU NOGOMETNOG TERENA N.K. "OBREŠ", SVETI ILIJA, HRVATSKA

Boyan Borisov¹, Bojan Đurin^{2*}, Josip Matin²

¹ University of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, Faculty of Hydrotechnics, Sofia, Bulgaria

² University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering, Varaždin, Croatia,

*E-mail of corresponding author: bojan.djurin@gfv.hr

Abstract: Rational and efficient use of water and energy in all kinds of human activities includes a system approach to the stated issues. Accordingly, new methodologies and processes for realization of the previously mentioned are understood as an imperative. This paper deals with the application of Solar Photovoltaic (PV) energy for driving the pumps for irrigation water pumping. This concept will apply an innovative and originally designed dimensioning method, called Critical Period Method. Irrigation system includes a Solar Photovoltaic (PV) generator and inverter, a pump station and water reservoir, pipelines and an irrigation device. This methodology or concept of irrigation will be applied in the case of the local football club "Obreš" in the municipality of Sveti Ilija near Varaždin in Croatia. The presented solution is in conformity to the world and European legislation, directives and strategies related to the negative impacts of climate changes and greenhouse gas emissions.

Keywords: Solar photovoltaic energy, irrigation, Critical Period Method

Sažetak: Racionalno i učinkovito korištenje vode i energije u svim područjima ljudske aktivnosti podrazumijeva sustavni pristup u navedenoj problematici. U skladu sa time, kao imperativ podrazumijevaju se nove metodologije i postupci za ostvarenje prethodno navedenoga. U ovom radu opisuje se primjena solarne fotonaponske (FN) energije za rad crpki za vodu za potrebe navodnjavanja. U ovom konceptu primijeniti će se inovativna i originalno osmišljena metoda dimenzioniranja, nazvana Metodom Kritičnog Perioda. Sustav za navodnjavanje uključuje solarni fotonaponski (FN) generator i pretvarač, crpnu stanicu, vodospremu, cjevovode i uređaj za navodnjavanje. Navedena metodologija, odnosno koncept navodnjavanja primijeniti će se na primjeru lokalnog nogometnog kluba F.C. "Obreš", na području općine Sveti Ilija u blizini Varaždina u Hrvatskoj. Prikazano rješenje je u skladu sa svjetskim i europskim zakonima, smjernicama i strategijama vezanim uz negativni utjecaj klimatskih promjena i emisija stakleničkih plinova.

Ključne riječi: Solarna fotonaponska energija, navodnjavanje, Metoda kritičnog perioda

Received: 02.03.2016 / Accepted: 02.06.2016

Published online: 04.07.2016

Pregledni rad / Review paper

1. BACKGROUND AND INTRODUCTION

Sustainable water supply is of great importance for the quality of living of both urban and rural areas throughout the world. Given the negative climate changes and reducing volumes of available sources of fossil fuels, which today is used extensively as a source of energy, sustainable use of water and energy by itself becomes imperative. Political and legal provisions contained in a big number of laws, guidelines and accompanying regulations also contribute to such reasoning. An important segment of sustainable urban and rural areas is the efficient use of water and energy for irrigation.

In comparison to all other renewable energy sources (RES), solar photovoltaic (PV) energy is the most suitable form for various uses in water supply (Boizidi, 2013; Đurin & Margeta, 2014; Chandel et al. 2015; Bakelli et al. 2011; Ebaid et al. 2013; Ghoneim 2006; Hamidat & Benyoucef 2009), as well as for the irrigation (Margeta & Glasnović 2007; Hamidat et al. 2002; Cuadros et al. 2004) and many others. The analyzed irrigation system includes a PV generator and inverter, a pump station, a water reservoir and pipelines. PV energy

is used as energy source for the pump station to supply the water reservoir with water. The water from the reservoir is dispatched to a grass lawn via the pipelines or irrigation device.

Irrigation systems don't typically have security requirements in view of quality or quantity of energy and water inflow and outflow, as opposed to water which is intended for water supply, since the water used for such purposes is not a food product for humans and animals. This is especially pronounced in the case of water used for irrigation of sports fields. However, in accordance with current trends to reduce energy and water consumption, these systems also require attention in the dimensioning process. Therefore, for this purpose it is necessary to apply the existing knowledge and treat the irrigation system as if it were a water supply system for the peoples' needs. The following will give an overview of the usual dimensioning methods of water supply systems, which are linked to the aforementioned Critical Period Method which improves the common dimensioning methods (Đurin & Margeta 2014).

The elaborated sizing procedure of such type of the water supply systems, using the Method of Worst Month, (Ebaid et al. 2013), has been improved in (Đurin

& Margeta 2014) and especially in Đurin (2014), using the original and innovative designed Critical Period Method. In doing so, each part of the water supply system is separately sized with respect to its corresponding critical day/period of the year. The Critical Period Method will be modified for application in irrigation, because for this purpose it includes certain specific characteristics which affect the relationships of all parts of the system. This will be described in the case of irrigation of a pitch of the local football club, named F.C. "Obreš" on location Sveti Ilija, near Varaždin in Croatia. For irrigation water demands, groundwater is used in combination with rainwater.

2. DESCRIPTION OF THE OBSERVED IRRIGATION SYSTEM

This paper analyses an autonomous water supply system, which uses PV energy to drive the pump stations, which pumps the water into the water reservoirs, **Figure 1**.

PV cells forms the PV generator. PV generator is used for the conversion of solar radiation into direct current power, which is converted by inverters into alternating current necessary for pump drive. Available insolation E_s , i.e., electric energy $P_{el,PV}$ determines the appropriate period of the pump station operation T_s with uniform rate during daily work period.

It is necessary to set up two pumps; first pump (pump 1 in a well) is used to pump water from a well and deliver it to the water reservoir 1. Rainwater is collected in this water reservoir. Rainwater is collected from the existing roofs and PV cells via grooves for water storage into the water reservoir 1. If the roof or the solar cells are at a sufficient slope, the rainwater is drained by gravity (free fall). In case if such gravitational flow is not possible, it is necessary to install a "booster" pump for pumping over. It should be noted that in considered case water reservoir 1 does not have usual function as a conventional water reservoirs for flow and consumption equalization, since both pumps operate when the

intensity of solar radiation is at its optimal operating level. This implies that the hourly, as well as daily water input is the same as hourly/daily water output from this water reservoir, so there is no need to provide volume for the equalization. Water is drawn by surface pump 2 from the water reservoir 1 into the water reservoir 2 by gravity or by booster pump. From water reservoir 2, water is collected and distributed to the areas being irrigated. However, if the irrigation system with water reservoir on tower is applied in urban area, there would be no need for tower construction, since some other existing elevated structure could be used for this purpose, skyscraper for example, or the existing spotlight pillars on football stadiums etc. These types of irrigation can be also used for enclosed areas (greenhouses).

Typically, water is pumped over into water reservoirs during the day, while the irrigation takes place at night, which is more suitable for the vegetation, with the reduced evapotranspiration as well. The distribution of water from water reservoir to the crops is gravitational, since the water reservoir is situated at a certain height above the ground surface thus achieving the required water pressure.

In any case, it is necessary to provide the required volume of the water reservoir 2, namely the water required to meet the irrigation needs. Primarily this need will be provided by groundwater, with a certain amount obtained from rainwater. However, an additional volume of rainwater will not be foreseen for the water reservoir 2, since it is assumed that this quantity of water will be considerably lower than the planned amount of water quantity from the well. Rainwater has an additional purpose of mixing with underground water, which makes it more suitable for the irrigated vegetation. In addition, this amount of water to some extent also relieves the underground aquifer layer.

The last part of the observed system includes the output pipelines from the water reservoir 2. In this case one can predict the irrigation of an area based on the installed connected pipelines or irrigation devices.

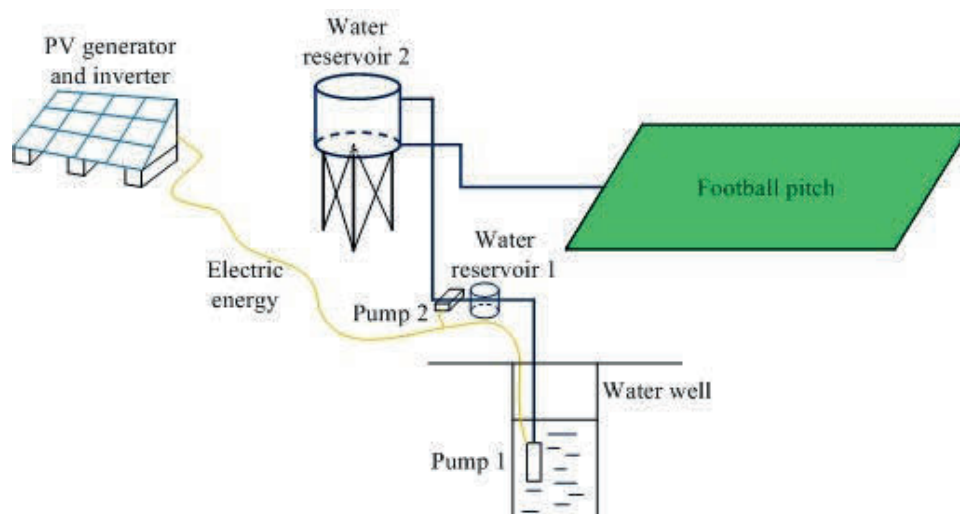


Figure 1. General (schematic) view of the observed irrigation system (modified from Agriwaterpedia 2015)

3. METHODOLOGY

3.1. Sizing procedure

Power of a subsystem PV, $P_{el,PV}$ (W) which generates electrical energy for pumping the water to water reservoir at a certain period of time i , representing days of the year, $i = 1, 2, \dots, 365$ days, is equal to (Đurin & Margeta 2014):

$$P_{el,PV(i)} = \frac{2.72H_{PS(i)}}{[1 - \alpha_c (T_{cell(i)} - T_0)]\eta_{PSI} E_{s(i)}} V_{PS(i)} \quad (1)$$

where $H_{PS(i)}$ (m) is manometer height, $V_{PS(i)}$ (m³/day) is daily amount of water pumped into the water reservoir at a certain time period (day) i , α_c is solar cell temperature coefficient (°C⁻¹), T_{cell} is solar cell mean daily temperature (°C), T_0 is solar cell mean daily temperature in standard test conditions, which is 25°C, η_{PSI} is pump station and inverter mean efficiency (%), $E_{s(i)}$ (kWh/m²) is available mean daily average intensity of solar radiation for the time interval i .

Electricity produced, $E_{el,PV(i)}$ (Wh), in period T_i is expressed by:

$$E_{el,PV(i)} = P_{el,PV(i)} \times T_i \quad (2)$$

Mean daily temperature of a solar cell, $T_{cell(i)}$, is obtained using (Đurin & Margeta 2014):

$$T_{cell(i)} = 2.7 \times E_{s(i)} + T_{a(i)} \quad (3)$$

where $T_{a(i)}$ is a mean daily air temperature (°C).

Mean efficiency of the pump station and inverter η_{PSI} is obtained as (Đurin & Margeta 2014):

$$H_{PSI} = \eta_{PS} \times \eta_I \quad (4)$$

where η_{PS} is pump station efficiency, while η_I is inverter efficiency.

For a given power of a subsystem PV, $P_{el,PV(i)}$, the possible amount of water $V_{PS(i)}$ (m³), pumped into the water reservoir during the time interval i is equal to:

$$V_{PS(i)} = \frac{[1 - \alpha_c (T_{cell(i)} - T_0)]\eta_{PSI} E_{s(i)}}{2.72H_{PS(i)}} P_{el,PV(i)} \quad (5)$$

The required area of a PV generator A_{PV} (m²) is obtained from (Đurin & Margeta 2014):

$$A_{PV} = \frac{P_{el,PV}}{1000\eta_{PV}} \quad (6)$$

where η_{PV} is a mean efficiency of a subsystem PV.

If all the available daily solar energy E_s , or electricity produced, will be used for pumping $V_{PS(i)}$ into the water reservoir, the average necessary capacity of the pump station $Q_{PS,available(i)}$ will then be equal to:

$$Q_{PS,available(i)} = \frac{V_{PS(i)}}{T_{s(i)}} = \frac{P_{el,PV(i)}}{T_{s(i)}} \frac{[1 - \alpha_c (T_{cell} - T_0)]\eta_{PSI} E_{s(i)}}{2.72H_{PS(i)}} \quad (7)$$

namely:

$$Q_{PS} \geq \max Q_{PS,available(i)} \quad (8)$$

$T_{s(i)}$ is the daily number of peak sun hours or usable duration of insolation, which is obtained by the (Ebaid et al. 2013):

$$T_{s(i)} = \frac{E_{s(i)}}{1000} \quad (9)$$

The number of peak sun hours is merely an estimation of the amount of time per day that the irradiance is equal to a peak Sun, and because PV models are rated for their output under peak sun conditions, the number of daily peak Sun hours indicates how many hours of each day the PV array will operate at its full power output.

However, if all water quantity $V_{PS(i)}$ does not necessarily need to be pumped over, namely if the water quantity $V_{PS(i)}$ is greater than the required amount of water for the irrigation needs $V_{daily(i)}$, then minimal average required pump capacity $Q_{PS,needed(i)}$ is equal to:

$$Q_{PS,needed(i)} = \frac{V_{daily(i)}}{T_{s(i)}} \quad (10)$$

Since the purpose of the pump is pumping (lifting) water into the water reservoir, the required capacity Q_{PS}^* is:

$$Q_{PS}^* = \max(Q_{PS,needed(i)}) \quad (11)$$

Average power of the pump station P_{PS}^* is then:

$$P_{PS}^* = \frac{\rho g Q_{PS}^* H_{PS}}{\eta_{PS}} \quad (12)$$

where η_{PS} is average efficiency of the pump station.

Water reservoirs are typically sized for one-day water equalization of supply and consumption for a day with maximum consumption, but equalization can also be done for more days, up to seven. Volume of the water reservoir V is defined for each day in a year by method of integral curve, i.e. Ripley method (Đurin et al. 2015):

$$V = \max \left[\sum_{t=1}^{24} (Q_{PS(t)} - Q_{hour(t)}) \right] \quad (13)$$

where $t = 1, 2, \dots, 24$ h.

Equation (13) applies if within a period of $t = 1$ hour up to 24 hours (one day) the water inflow of the water reservoir is the same as water outfall from the water reservoir. It is a simple methodology based on the fact that within the period of exchange, which can be the period of one up to seven days, all the water inflow is the same as the outfall from the reservoir.

3.2. Definition of the Critical Period Method

In this paper we used the approach based on critical design period, whereby the Critical Period Method was devised (Đurin & Margeta 2014). This approach includes design elements of the solution: PV generator, pump station and water reservoir based on the critical period of operation of each one. It is also a conservative approach, meaning that the elements of the solution are potentially oversized. However, such an approach provides a reliable solution and a required level of reliability, necessary for the functioning of water supply systems. The reliability of the bulk water supply system can be defined in terms of reliability of its storage reservoir/tank, as consumers will only notice a service interruption if the storage tank has failed (i.e., run dry).

The balancing period of water pumping and water reservoir water balance is usually at least one day and may be several days, usually no more than five, ($t_b = 1$ till 5 days). A longer balance period reduces the uncertainty of solar irradiation and increases the reliability of the solution. With a longer balancing period, the system is more cost-effective from the perspective of solar energy harvesting, because the sum of overall available solar radiation is greater when the balancing period is longer. This means that the required water volume can be pumped with lower installed PV system power $P_{el,PV}$. Normally, with a longer balancing period, the storage capacity of the reservoir V_{op} will be higher.

At the beginning of the analysis it is necessary to define the daily quantity of water for irrigation purpose $V_{daily,i}$ (m³/day), according to the vegetation characteristics and water consumption regime throughout the analyzed months of the planning period. After this, the daily water usage pattern $V_{hourly,t}$ (m³/h) in the period of $t = 1, 2, \dots, 24$ hours is determined (diurnal pattern). To simplify further calculations, it is assumed that the same pattern is used for each day and throughout the analyzed months. In such analyzes, a hydrological analysis, taking into account evapotranspiration and soil moisture of the football field, as well as agronomic and pedological analysis should be made. However, since it is a conceptual level of the observed problem, that analysis is not taken into account.

Based on the obtained values, the minimum required size of the PV system is determined, which provides the necessary inflow of water in the critical period. Based on the selected/calculated initial values, $P_{el,PV}$ and V_{PS} , which satisfy water demand V_{daily} in the planning period, the minimum required $P_{el,PV}$ is determined from established differences $\Delta V_{tb,i}$:

$$\Delta V_{tb,i} = V_{PS,tb,i} - V_{daily,tb,i} \quad (14)$$

The critical day/period $t_{Pel,PV,tb,i}^*$ for PV generator design is determined by the minimum daily difference using statistical minimization:

$$\min \Delta V_{tb,i} \Rightarrow t_{Pel,PV,tb,i}^* \quad (15)$$

where $\Delta V_{tb,i}$ is an acceptable difference in practice application which is typically equal to 0.

The required operation volume of water reservoir 2, V , is obtained using the (13). Time step for calculation is one hour, $t = 1, 2, \dots, 24$ hours. In general, the critical day/period for the design of volume reservoir $t_{V,tb,i}^*$ is the day with maximum water demand and the shortest duration of solar radiation suitable for pump station operation, providing that on the available day insolation $E_{s(i)}$ is sufficiently high. A critical day/period for the pump station $t_{PS,tb,i}^*$ also coincides with this critical day. It should be noted that the fire volume is not taken into account for this case, because in this case there are water needs only for irrigation. Also, it is not foreseen to provide additional volume of water reservoirs for emergency situations since it is meant irrigation. Based on the above mentioned, the required volume V^* for each variant t_b is obtained using statistical maximization, with the associated critical day:

$$V^* \geq \max V \Rightarrow t_{V,tb,i}^* \quad (16)$$

The same situation applies to the capacity of pump stations:

$$Q_{PS}^* \geq \max Q_{PS} \Rightarrow t_{PS,tb,i}^* \quad (17)$$

Daily quantity of water for irrigation purpose V_{daily} (m³/day) is obtained to the most part by pumping groundwater and to a lesser extent from rainwater. Due to stochastic nature of the rain, the safest option is providing backup volume of water reservoir 1 of a same volume as the quantity of collected rainwater. At the same time this size represents the additional quantity of water for emergency situations.

The same procedure is used for balancing periods t_b bigger than one day, where is used scheme as is shown on **Figure 2**, on example for $t_b = 2$ days.

4. CASE STUDY AND RESULTS

4.1. Location

Described methodology of sizing the irrigation system, i.e. Critical Period method, will be illustrated on the example of pitch irrigation for the local football club Obreš, located near Varaždin on the territory of Sveti Ilija municipality (**Figure 3**). The football pitch covers the area of 105 x 70 m. The altitude of the location is 173 m asl. **Figure 4** shows the position of all elements of the analyzed system. According to the recommendations from bibliography (Ghoneim 2006) and the position of the available area, the azimuth (angle spread) of the PV generator is in the south direction, while the angle of inclination is equal to 15°.

Groundwater, which is situated in shallow layers already at a depth of 5 m, is used for irrigation, and the usage of the existing well showed that its capacity is sufficient. Another favorable fact is that the level of underground water on case study location is situated in the shallow area of rich Varaždin aquifer (Hlevnjak et al. 2015). Since the biggest problems include the

impracticality of the existing irrigation system with rubber hoses, unsustainable water and energy consumption, as well as insufficient capacity of the

existing lifting pump in the well, there is a plan to build a new, more modern and sustainable irrigation system.

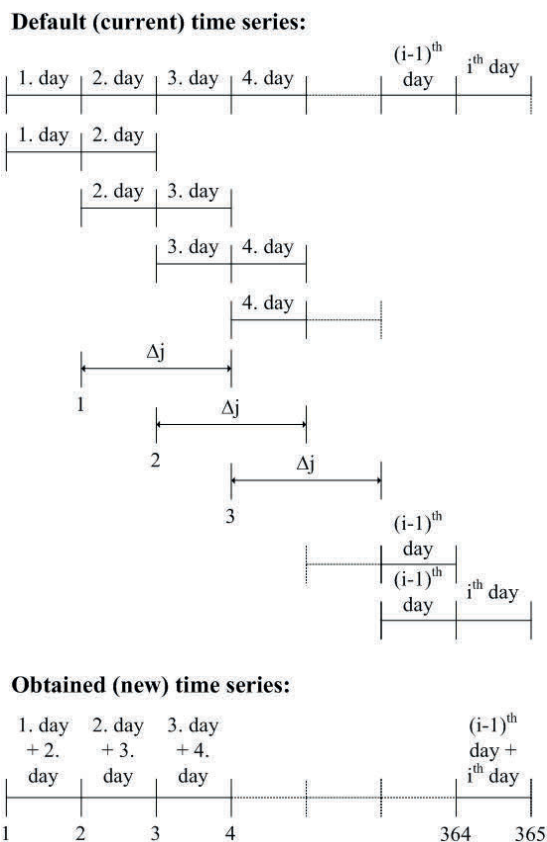


Figure 2. Schematic view of the forming of the time series membership for the balancing period $t_b = 2$ days



Figure 3. Position of the municipality Sveti Ilija, Croatia (modified from Adria24 2015 and Google maps 2016)



Figure 4. Irrigation system layout scheme (modified from Google maps 2016)

4.2. Input values

According to the recommendations from the bibliography (Buy Irrigation 2015) and the actual needs, the adopted daily constant water need (consumption) V_{daily} from May to August, and within these 4 months amounts to 30 m^3 (Figure 5). During the system operation over (out of) a period of 4 to 8 months, there will be an electric power surplus (or water surplus), which can be sold within the power (water) distribution system, or used for other purposes.

The football pitch is not irrigated during other periods of the year. There are two daily regimes of water consumption, i.e. water inflow and outfall (input/output) of water reservoir (Figure 6). In every hour, regarding of the daily irrigation regimes, football pitch is irrigated with $3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Regime 1 (from 22 to 6 hours and from 14 to 16 hours) is more favorable if the pitch is busy during the day, and also it is more suitable for the grass if irrigation takes place during the night. Regime 2 (from 9 to 18 hours) is more practical considering the possibility of theft of the irrigation equipment, as well as the need to impose security measures for its prevention (alarms, physical protection). This irrigation regime is especially

suitable if lighting of the field, respectively training and playing, is provided on night conditions.

Figure 7 shows average daily insolation intensity, where the angle of inclination of PV generator surface is equal to 15° and azimuth (angle spread) is in the south direction (SODA 2016) and peak hours period, Equation (9). Figure 8 shows average daily air (MHSC 2015) and solar cell temperature, Equation (3), for the observed area. The data from MHSC (2015) are expressed as mean values for the duration of 10 years, i.e. for the period from 2004. to 2013. Also, the data from SODA (2016) was available and expressed as a mean values only for the duration of two years, 2004. and 2005.

Based on common values from references, (Đurin & Margeta 2014) the following values of input data are adopted. Average inverter efficiency is $\eta_I = 90 \%$, while the average pump station efficiency is $\eta_{PS} = 60 \%$. Average inverter and pump efficiency, with respect to Equation (4), is $\eta_{PSI} = 54 \%$, solar cell temperature coefficient is $\alpha_C = 0.005 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, and solar cell temperature in Standard Test Conditions is $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Adopted PV system efficiency is $\eta_{PV} = 15 \%$. Figure 9 shows mean of the monthly cumulative precipitation heights from May till August from 2004. to 2013.

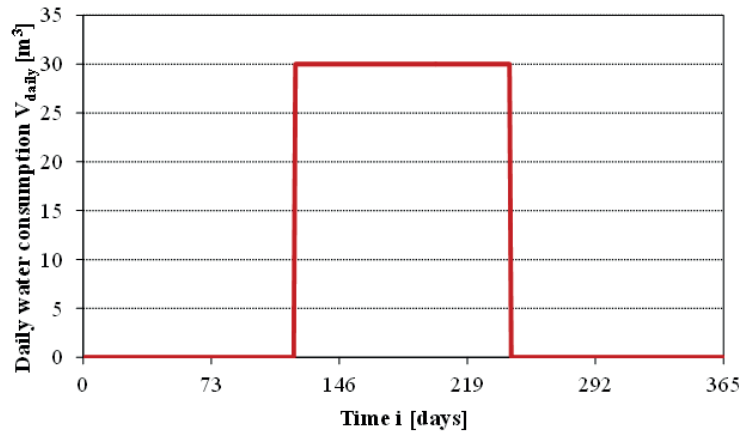


Figure 5. Yearly regimes of football pitch irrigation

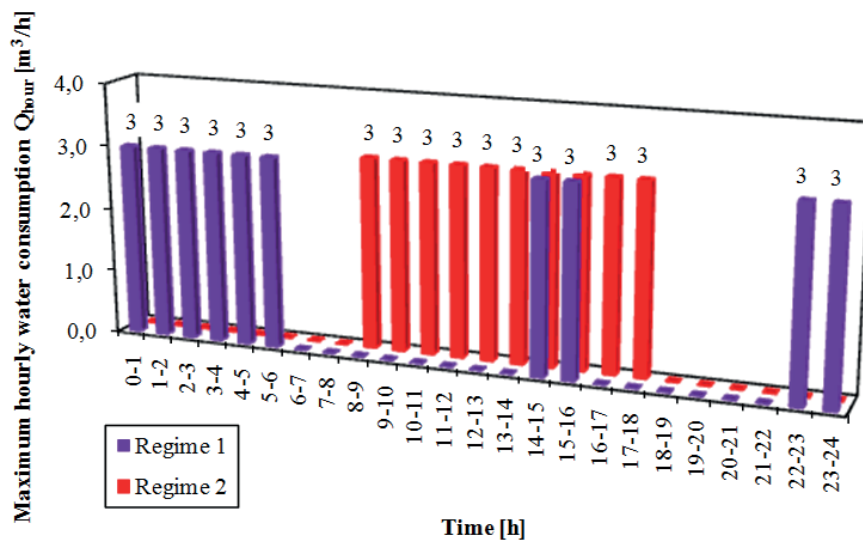


Figure 6. Daily regimes of football pitch irrigation

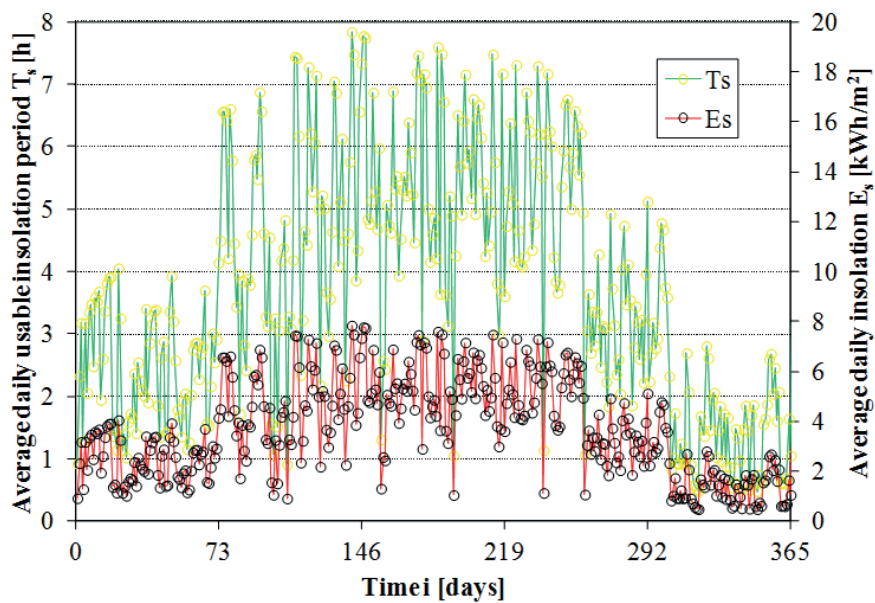


Figure 7. Average daily usable insolation period and insolation intensity

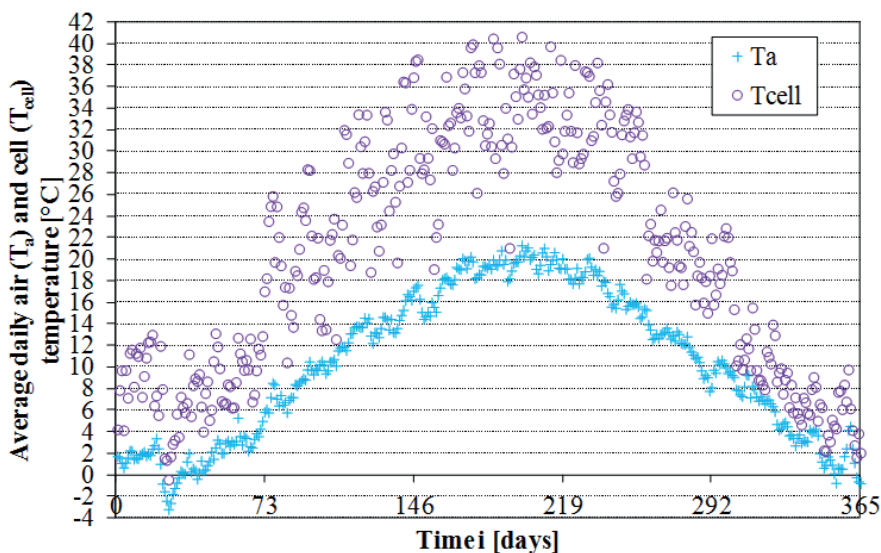


Figure 8. Average daily air and solar cell temperature

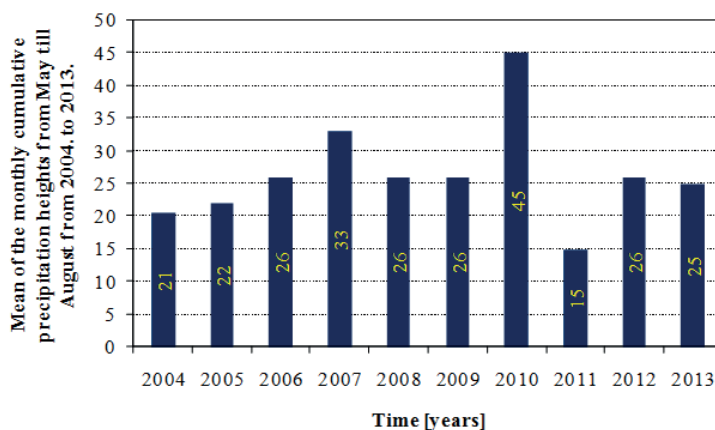


Figure 9. Mean of the monthly cumulative precipitation heights from May till August from 2004. to 2013.

Table 1. Critical days for sizing of all parts of the irrigation system

Balancing periods t_b (days)	1	2	3	4	5
Critical period (days in year) for the subsystem PV, t_{PV}^*	239	156-157	156-158	156-159	156-160
Critical period (days in year) for the subsystem V, t_V^*	239	238-239	155-157	154-157	156-160
Critical period (days in year) for the subsystem PS, t_{PS}^*	239	238-239	155-157	154-157	156-160

5. OBTAINED RESULTS AND DISCUSSION

The sizing procedure will be carried out for the period of balancing from one day ($t_b = 1$ day) to five days ($t_b = 5$ days). Critical days for sizing of all parts of the subsystem are shown in **Table 1**, according to the **Equations (15-17)**.

Table 1 shows that critical day for dimensioning of PV subsystems are in the same period of the year. Since

the PV subsystem power and the amount of pumped water are functionally linked, **Equations (1)** and **(5)**, and the water consumption regime is constant, the observed overlapping is explained by the above mentioned. As for the critical period for sizing the subsystem V, $t_{V, tb, i}^*$ and PS, $t_{PS, tb, i}^*$, overlapping is also observed. According to **Equations (17) and (18)**, these critical periods depend on water consumption regime and the duration of pumping water into the water tank, or on the duration of

pump operation. In other words, they depend on the duration of solar radiation suitable for pumping water, T_s . Since the water consumption regime is constant and critical periods depend on the duration of the pump operation, these critical periods will be at the time of the year when the duration of solar radiation suitable for pumping is minimum.

Taking into account the estimated total pressure losses in all the pipelines, secured height to prevent cavitation, as well as the required pressure of 3.5 bar for operation of the irrigation device (Buy Irrigation 2015), the adopted height of the water reservoir is 50 m, with the adopted pipeline diameter of 5 cm (as well as all pipelines) to the water reservoir. Pipe material is cast iron with bitumen, roughness coefficient is 0.1 mm, while the operating roughness coefficient is 0.11 mm (with the increase of 10 % to compensate local losses). The total calculated manometer height of a submersible well pump (with total pressure losses included, as well as secured height to prevent cavitation) is 10 m. Water is delivered from water reservoir 1 to water reservoir 2 by surface pump 2. The minimum or maximum speed range for water flow in inlet pipelines in both water reservoirs ranges from 0.5 m/s up to 2 m/s with respect to minimum (3.75 m³/h) and maximum (15 m³/h) hourly input water flow values to reservoirs 1 and 2. This means that the adopted capacity for both pumps is 15 m³/h.

The necessary power of PV generator and inverter $P_{el,PV}$ i.e. required power for pump operation for every balancing period t_b is obtained using **Equations (1, 3, 4, 14 and 15)** and adopted required input values. These obtained values of the PV system power $P_{el,PV}$ are shown on **Figure 10**.

Figure 10 shows a trend of decline in the PV subsystem power $P_{el,PV}$ with increased balancing period t_b , which is in line with the input assumptions. The largest decrease was observed between $t_b = 1$ day and $t_b = 2$ days, 2714 W, i.e. a decrease of 58 %. Between $t_b = 2$ days and $t_b = 5$ days the decrease is 62 %. This also confirms the analogous conclusions obtained in earlier papers (Đurin & Margeta 2014; Margeta et al. 2011).

Figure 11 shows the required area of PV generator A_{PV} , obtained by using of the **Equation (6)**. Analogously of the decreasing of the required area of PV generator A_{PV} with increasing of the balancing periods t_b , there are identical conclusions which were adopted for the power of PV generator $P_{el,PV}$, **Figure 10**.

The required volume of the water reservoir 2 is $V = 24$ m³ for all balancing periods, based on **Equations (9, 11, 13, 16)** and with regard to water needs, as well as both water consumption regimes (Regime 1 and 2), **Figure 12**.

It should be noted that water reservoir 1 volume is adopted based on the mean daily value of measured precipitation height within the observed period of 10 years (from 2004. to 2013.), which is 27.9 mm (MHSC 2015), with assumptions that losses of the storm water and also an evaporation is equal to 0. As a rule, the amount of storm water is calculated using statistical methods, taking into account certain probabilities of occurrence and return periods. This was not done due to the limited scope of this work as well as relatively small

areas for rainwater collection. Because of this, it is necessary to ensure a certain capacity of the reservoir 1 which is equal to this extreme amount of water, rather than equalization of water inflow from the well and flow that goes from reservoir 1 to reservoir 2. It can be seen that required water reservoir volumes are decreasing with increasing of the balancing period, which is explained by decreasing of the PV generator area, A_{PV} .

Required power of the pumps P_{PS} are obtained by using of the **Equations (10-12, 17)** and shown on **Figure 13**.

Analogously to the case of reservoir volume, it is evident that the power of the pumping station is constant for each balancing period t_b . This is explained by the necessity to provide the capacity, i.e. pumping station power so that it can pump the required quantity of water. Since the amount of water is constant throughout the year, or days (**Figures 5 and 6**), this means that the capacity or pumping station power must be the same.

6. CONCLUSIONS

The aim of this study was to show the concept of systematic and sustainable use of water and energy in the case of football field of the local club. This solution can also be applied for urban areas, on local as well as regional scale for different purposes. Also, this solution can be used in combination with conventional sources of energy from the electricity grid. The resulting solution is conservatively selected/sized, enabling high reliability of irrigation system, which is particularly affected by the increase in the balancing period t_b . It also allows the use of surplus electricity generated for other purposes (lighting, operation of various electrical devices, etc.) or for distribution or sale within the electricity network. It is necessary to take into account the long-standing trend of decreasing prices of PV cells, where the current average price is 0.4 US \$ per 1 peak Watt of power (Energy Trend 2016; PVinsights, 2016; SolarServer 2016). An additional fact in favor of this is the current trend of increasing the efficiency of PV cells, where currently the largest practical efficiency of the cells is 38.8% (Green et al. 2015), while laboratory efficiency is 46.0 % (National Energy Renewable Laboratory 2016). Due to small quantities of collected rainwater, in this analysis it does not replace the affected groundwater, but still ensures a certain backup volume of water. Storm water also improves the quality of water used for irrigation. It is important to note that purified wastewater can also be used for irrigation of grass areas, especially in rural areas without significant influence of industry. It is also shown that water reservoirs, apart from irrigation purposes and hydraulic function of water storage, function as energy storage as well. Shown solution fits into global and European strategies and guidelines related to the reduction of greenhouse gasses, increasing the use of renewable energy sources and energy efficiency increase.

Further research would consist of using of the multicriterial methods, taking into the account economic, environmental and social criterions.

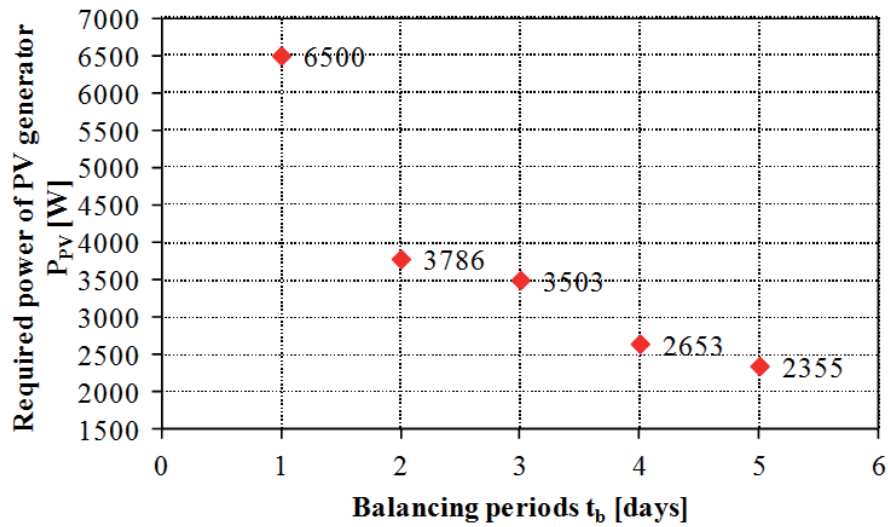


Figure 10. Required power of a PV generator in accordance with the length of the balancing period

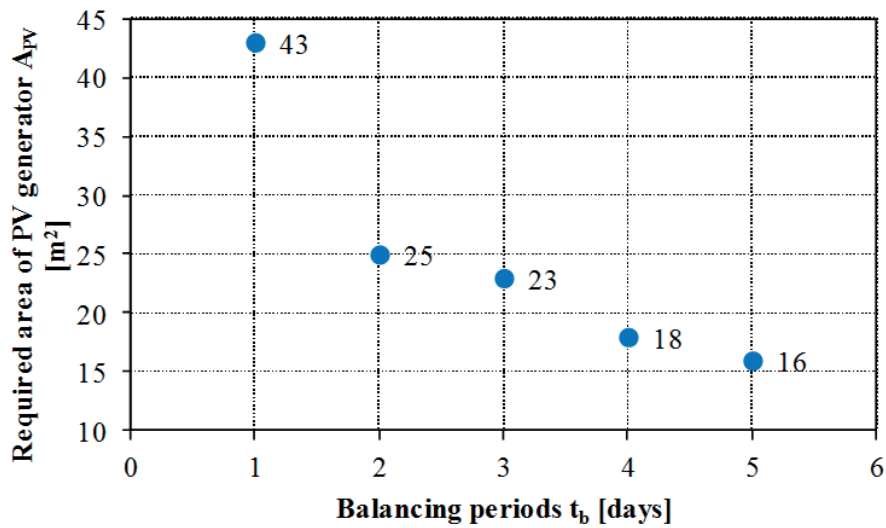


Figure 11. Required area of a PV generator in accordance with the length of the balancing period

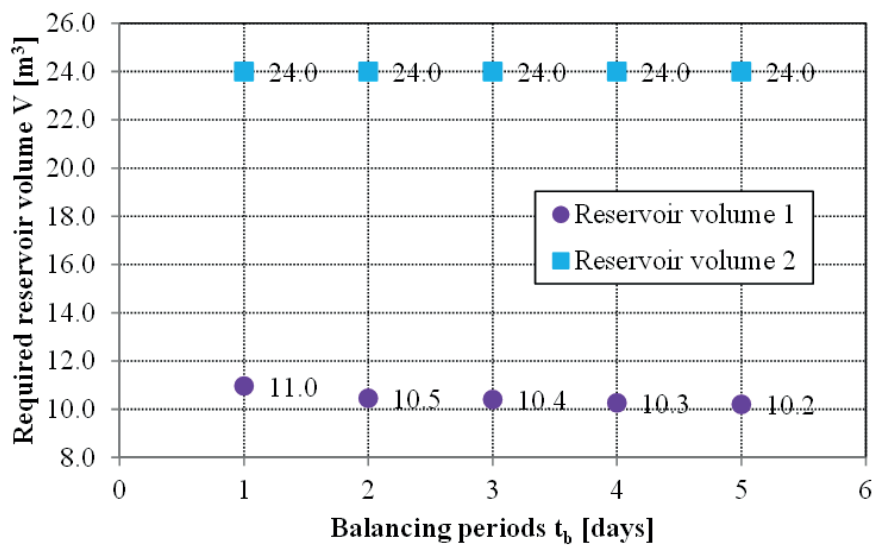


Figure 12. Required volume of a water reservoirs in accordance with the length of the balancing period

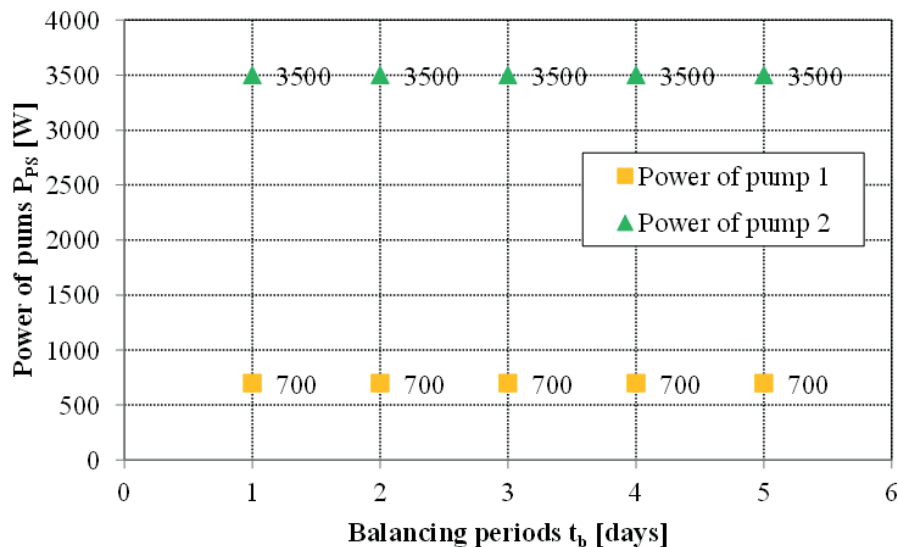


Figure 13. Required power of the pumps in accordance with the length of the balancing period

7. REFERENCES

- Adria24, <http://www.adria24.hr/destinacije/>, (Access Date: 27 December, 2015)
- Agriwaterpedia, http://agriwaterpedia.info/wiki/Solar_Powered_Water_Pumps (Access Date: 20 December 2015)
- Boizidi B. (2013) New sizing method of PV water pumping systems, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 4, pp. 1-10
- Bakelli Y., Hadj A. A., & Azoui B. (2011) Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept, *Solar Energy*, vol. 85, pp. 288-294
- Buy Irrigation, <https://buyirrigation.wordpress.com/tag/football-pitch-irrigation/>, (Access Date: 28 July, 2015)
- Chandel S. S., Nagaraju M., Naik, & Chande R. (2015) Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1084-1099
- Cuadros F., Lopez-Rodriguez F., Marcos A. & Coello J. (2004) A procedure to size solar-powered irrigation (photoirrigation) schemes, *Solar Energy*, vol. 76, pp. 465-473
- Đurin B. & Margeta J. (2014) Analysis of the possible use of solar photovoltaic energy in urban water supply systems, *Water*, vol. 6, pp. 1546-1561
- Đurin B. (2014) Sustainability of the urban water supply system operating, PhD thesis (on Croatian), Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, Split, Croatia
- Đurin B., Margeta J. & Bojanić D. (2015) The Impact of the Water Consumption Regime on the Work of Reservoirs, *E-Water*, 2015, vol 1, pp. 1-21
- Ebaid M. S. Y., Qandil H. & Hammad M. (2013) A unified approach for designing a photovoltaic solar system for the underground water pumping well-34 at Disi aquifer, *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 780-795
- Energy Trend, <http://pv.energytrend.com/pricequotes.html> (Access Date: 18 february 2016)
- Ghoneim A. A. (2006) Design optimization of photovoltaic powered water pumping system, *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 1449-1463
- Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W. & Dunlop E. D. (2015) Solar cell efficiency tables (version 46), *Progress In Photovoltaics: Research And Applications*, vol. 23, pp. 805-812
- Google maps, location of municipality Sveti Ilija and football pitch F.C. Obreš, <https://www.google.hr/maps/>, (Access Date: 20 January, 2016)
- Hamidat A. & Benyoucef B. (2009) Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage, *Energy Policy*, vol. 37, pp. 1489-1501
- Hamidat A., Benyoucef B. & Hartani T. (2002) Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions, *Renewable Energy*, 2002., vol. 28, pp. 1081-1096.
- Hlevnjak B., Strelec S. & Jasmin J. (2015) Hydrogeological Conditions of Occurrence of Clay Interbed within Varaždin Aquifer, (on Croatian), *Inženjerstvo okoliša*, vol. 2, pp. 73-81
- Meteorological and Hydrological Service (MHSC) (2015) Meteorological and hydrological data for Varaždin from 2004. till 2014., (In Croatian), MHSC: Zagreb, Croatia
- Margeta J. & Glasnović Z. (2007) Optimization of Irrigation with Photovoltaic Pumping System for Irrigation, *Water Resources Management*, vol. 21, pp. 1277-1297
- Margeta J., Đurin B. & Glasnović Z. (2011) Urban water supply generated by PV energy, *ISES Solar World Congress*, Kassel, Germany, pp. 1-11
- National Renewable Energy Laboratory, http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg (Access Date: 21 February 2016)
- PVinsights, <http://pvinsights.com/> (Access Date: 22 February, 2016).
- SODA-Solar Radiation Data-Solar Energy Services for Professionals, http://www.soda-is.com/eng/services/services_radiation_free_eng.php, (Access Date: 2 August, 2015).
- Solar Server, <http://www.solarserver.com/service/pvx-spot-market-price-index-solar-pv-modules.html> (Access Date: 15 January 2016).



Europska unija „Ulaganje u budućnost“
Projekt financira Europska unija iz Europskog socijalnog fonda

„Čista petica“

CILJ PROJEKTA:

Razvijanje odgojno-obrazovnog sustava koji omogućuje stjecanje znanja i vještina, te dodatnih kompetencija potrebnih za uspješan život i učenje u suvremenom društvu.

SVRHA PROJEKTA:

Uspostavljanje programskih, materijalnih i kadrovskih uvjeta u školi koja je nositelj projekta i u partnerskim školama za izvođenje jednog fakultativnog predmeta iz matematike te jednog interdisciplinarnog fakultativnog predmeta iz kemije i biologije i jednog interdisciplinarnog fakultativnog predmeta iz fizike i geografije. Motiviranje učenika za bolje svladavanje nastavnih u matematici i prirodoslovlju, te motiviranje za daljnje školovanje na takvim studijskim programima.

CILJNE SKUPINE, A UJEDNO I KRAJNJI KORISNICI:

- Nastavnici i učenici
- Roditelji učenika
- Cjelokupna javnost

PROJEKTNE AKTIVNOSTI:

1. Izrada kurikuluma i nastavnih materijala za fakultativni predmet „Matematika u svakodnevnom životu“
2. Izrada kurikuluma i nastavnih materijala te nabava opreme za interdisciplinarni predmet iz kemije i biologije „Farmacija i botanika“
3. Izrada kurikuluma i nastavnih materijala te nabava opreme za interdisciplinarni predmet iz geografije i fizike „Meteorologija i klimatologija“
4. Edukacija nastavnika, stručnih suradnika i ravnatelja za izradu kurikuluma i u području metoda definiranja ishoda učenja, primjerom dobre prakse u Finskoj, edukacija u upotrebi alata za e-učenje te nastavnici geografije i fizike educirani za izvođenje novog fakultativnog predmeta „Meteorologija i klimatologija“
5. Diseminacija novih kurikuluma putem web stranice, priručnika, novinskih članaka, konferencija za medije, okruglih stolova i stručnih skupova
6. Provedba promotivnih aktivnosti

Vrijednost projekta: 983.594,08 kn

Trajanje projekta: 12 mjeseci (23.10.2015-23.10.2016)

Posredničko tijelo razine 1:

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta

esf@mzos.hr

www.mzos.hr

Posredničko tijelo razine 2:

Agencija za strukovno obrazovanje i obrazovanje odraslih, Organizacijska jedinica za upravljanje strukturnim instrumentima DEFECO

defco@asoo.hr

www.asoo.hr/defco

www.esf.hr



OPORABA PET AMBALAŽE

PET PACKAGING RECOVERY

Anita Ptiček Siročić ^{1*}, Marijan Đurina ¹, Evica Špoljarić ²

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

² Drava International d.o.o. Stjepana Radića 15, 31000 Osijek, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: anita.pticek.sirocic@gfv.hr

Sažetak: Ubrzani razvoj industrijalizacije omogućio je široku upotrebu polimernih materijala ne prateći pritom posljedice nagomilavanja polimernog otpada na odlagalištima otpada. Otpadni polimerni materijali velik su problem u zaštiti okoliša, sve su veće opterećenje za okoliš te je važno poznavanje načina pristupa problemu, a primarno je poznavati podjelu, tj. vrste polimernih materijala te proces nastajanja takvog otpada. U okviru ovog rada provedena je analiza postupaka zbrinjavanja poli(etilen-tereftalata), PET-a, u tvrtki „Drava International” d.o.o. iz Osijeka. Tvrtka Drava International d.o.o. iz Osijeka primarno se bavi recikliranjem odnosno uporabom otpadne folije, otpadne PE folije i otpadne PET ambalaže. Proces recikliranja uključuje predobradu i recikliranje otpadne ambalaže pri čemu se dobiva granulirani materijal iz kojeg se daljnjim postupcima proizvodnje dobiva novi gotovi proizvod, ovisno o potrebama tržišta.

Cljučne riječi: polimeri, poli(etilen-tereftalat), polietilen, uporaba, recikliranje.

Abstract: The rapid development of industrialization allowed the widespread use of polymeric materials but without understanding the consequences of the accumulation of plastic waste in landfills. The waste polymeric materials are a major problem in environmental protection, all the more burdensome for the environment and it is important to know the ways to approach the problem, classification of polymer materials as well as formation process of polymeric waste. In this paper, an analysis of disposal methods of poly(ethylene terephthalate), PET, in the company „Drava International” d.o.o. in Osijek was carried out. This company is primarily engaged in recycling and recovery of waste foil, waste PE films and waste PET bottles. The process of recycling involves processing and recycling of waste packaging to give a granular material from which further processes of production result in a new finished product, depending on market needs.

Keywords: polymers, poly (ethylene-terephthalate), polyethylene, recovery, recycling.

Received: 27.04.2016 / Accepted: 20.06.2016

Published online: 04.07.2016

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Povećanom potrošnjom polimera i polimernih materijala porasle su i količine plastičnog otpada kojeg je nužno zbrinuti s ciljem postizanja minimalne štete po okoliš uz što pogodniji ekonomski trošak. Kako su polimeri i polimerni materijali zbog svoje male nasipne gustoće vrlo voluminozni, zauzimaju veliki prostor te vrlo brzo popunjavaju odlagališta otpada (Barriocanal et al. 2005). Razgradnja polimera dugotrajan je proces i polimerni materijali dugo ostaju u okolišu. Iz tog se razloga pojavila izrazita potreba za smanjivanjem količine otpada što je moguće postići učinkovitim zbrinjavanjem. Prioritetna metoda zbrinjavanja polimernog otpada jest prevencija stvaranja otpada, odnosno smanjenje nastanka otpada. Za učinkovito zbrinjavanje otpada neophodno je prikupljanje i sortiranje otpada na mjestu nastanka. Najpoželjnija metoda zbrinjavanja je recikliranje stoga se danas u velikim količinama recikliraju papir, staklo, metali i polimerni materijali dok je odlaganje ekološki neprihvatljivo i nepoželjno. Stoga, materijalno i energetske recikliranje sve je više zastupljeno jer su oba procesa ekonomična i isplativa. No, nijedan način

zbrinjavanja nije idealan te svaki od njih potencijalno može biti štetan za okoliš i zdravlje ljudi pa je neophodno ocijeniti njegov učinak te svesti mogući rizik na minimum (Kratofil Krehula 2010).

Poli(etilen-tereftalat), PET poliesterski je polimerni materijal širokog područja primjene, posebice kao ambalažnog materijala, čime se povećava udio PET-a u ukupnoj količini krutog otpada (Dimitrov et al. 2013; Ptiček Siročić et al. 2013). Najčešće metode koje se upotrebljavaju za recikliranje PET-a su mehaničko, kemijsko i energijsko recikliranje. Prije samog procesa recikliranja potrebno je provesti postupak predobrade polimernog otpada koji uključuje organizirano prikupljanje, razvrstavanje, usitnjavanje te pranje otpadnog PET-a, nakon čega slijedi postupak recikliranja (Azapagić et al. 2003; Carraher 2003). U radu je opisan postupak predobrade, koji obuhvaća prikupljanje, usitnjavanje te alkalno pranje PET-a i uporabe ambalažnih PET boca, s naglaskom na proizvodnju PET pretformi i vakuumata iz uporabljene sirovine.

2. SUSTAV GOSPODARENJA POLIMERNIM OTPADOM

Pod pojmom *gospodarenje otpadom* podrazumijeva se ekonomično i po okoliš razumno upravljanje cjelokupnim životnim vijekom/ciklusom otpada odnosno podrazumijeva brigu o otpadu koji nastaje u svim faza nastajanja proizvoda (prerada sirovine, proizvodnja i prerada) kao i odlaganje nakon upotrebe, što uključuje skupljanje, prijevoz, iskorištavanje, obrađivanje i odlaganje u skladu sa zakonskim obvezama. U Hrvatskoj se godišnje proizvede oko 143 000 tona plastičnoga otpada, od čega se 15 % oporabi. Doprinos uporabe plastike smanjenju emisija stakleničkih plinova je 1000 - 1700 kg/t materijalno oporabljenog čistog otpadnog materijala (PET-a, polistirena (PS), poli(vinil-klorida) (PVC)), 600 - 800 kg/t energijski oporabljenog plastičnog otpada te 150 kg/t materijalno oporabljenog miješanog plastičnog otpada (Azapagić et al. 2003; Barić 2009; Kratofil Krehula 2010).

Kao jedan od načina uvođenja reda u gospodarenju polimernim otpadom, 1. siječnja 2006. u Republici Hrvatskoj uveden je sustav razvrstavanja i prikupljanja PET ambalaže. Takav način sakupljanja pokazao je izvrsne rezultate, zato što je ustanovljeno da se tim sustavom prikuplja gotovo sva PET ambalaža. Zahvaljujući uspostavljenom sustavu gospodarenja PET bocama, do sada je sakupljeno 57 000 tona, od čega je 90 % oporabljeno u Hrvatskoj, a ostatak je izvezen (Barić 2009).

2.1. Metode zbrinjavanja ambalažnog polimernog otpada

Glavni ciljevi recikliranja polimernog otpada kao načina zbrinjavanja su: smanjivanje upotrebe prirodnih resursa, smanjivanje količine otpada i u konačnici, zaštita okoliša. Zbrinjavanje otpada uključuje njegovo prikupljanje, skladištenje, obrađivanje otpada prije odlaganja, prijevoz otpada, zatvaranje i/ili saniranje odlagališta te recikliranje. Uspješno prikupljanje polimernog otpada započinje dobrom organizacijom, a najpogodnije je na izvoru njegova nastajanja, na početku i kraju proizvodnog procesa te na kraju uporabnog vijeka u kućanstvima i industriji.

Smanjenjem nastajanja otpada u proizvodnom dijelu te njegovim povratkom u proizvodni proces znatno se mogu smanjiti troškovi proizvodnje (Vilaplana et al. 2008).

Zbog različitih vrsta plastičnih materijala koji se koriste i činjenice da nisu međusobno kompatibilni, sortiranje otpadnih plastičnih materijala predstavlja osnovni dio postupka recikliranja. Polimerna ambalaža izrađuje se kombiniranjem različitih materijala i oblika, što otežava sortiranje, a ponekad potpuno onemogućava ponovnu upotrebu (Šćedrov et al. 2008). Radi jednostavnijeg i efikasnijeg prikupljanja, sortiranja i recikliranja, proizvodi od različitih vrsta plastike označavaju se prema Pravilniku o ambalaži i ambalažnom otpadu (NN Pravilnik o ambalaži i ambalažnom otpadu, Narodne novine 94/13 2015) brojevima i simbolima plastičnih ambalažnih proizvoda od jedan do šest dok se broj sedam odnosi na sve ostale vrste (Slika 1).

Sortiranje polimernog otpada provodi se ručno ili automatiziranim vođenjem pomoću računala. Ručno sortiranje, koje je najčešće neefikasno i ekonomski nepovoljno, vrši se na osnovi vizualne identifikacije otisnutog identifikacijskog broja na ambalaži te na osnovi nijansi i različitih obojenja. Automatizirano sortiranje bazira se na metodi identifikacije otpadnih plastičnih materijala odnosno prema razlikama u kemijskim, optičkim, električnim ili fizikalnim svojstvima plastičnih materijala. Većina fizikalnih procesa oslanja se na jedinstveno svojstvo nekog polimera kao što su: gustoća, hidrofobnost, prisustvo klora ili na specifično svojstvo polimera koje varira sa temperaturom; točka taljenja, topljivost. Komercijalna metoda sortiranja mora biti brza, pouzdana, ekonomična i fleksibilna kako bi dorasla različitim oblicima kontaminacije kao npr. variranju boje. Nakon provedenog procesa sortiranja, plastika se priprema za recikliranje. Kako bi otpadna plastika bila prikladnija za transport i punjenje reciklažnog postrojenja, neophodno je usitnjavanje plastike zbog njene voluminoznosti. Mehaničke tehnike usitnjavanja su: mrvljenje i granuliranje; zgušćivanje i zbijanje te mljevenje u prah. Postupak usitnjavanja otpadne plastike omogućuje odstranjivanje ostalih materijala s proizvoda, a često se postupci usitnjavanja kombiniraju s procesom recikliranja.



Slika 1. Simboli pojedinih vrsta polimernih materijala

2.2. Recikliranje polimernog otpada

Pojam recikliranja ili oporavak označava ponovnu uporabu plastičnog otpada, što podrazumijeva svaki postupak recikliranja na temelju kojega se otpadni materijali ponovno obrađuju u proizvode, materijale ili tvari, za izvornu ili za neku drugu svrhu. Recikliranje materijala uključuje ponovno prerađivanje organskog materijala, no ne uključuje iskorištavanje energije i prerađivanje u materijale koji će se koristiti kao gorivo ili u neke druge svrhe (Kratofil Krehula et al. 2015, Azapagić et al. 2003).

Mehaničko recikliranje predstavlja toplinsku preradu materijala, taljenje i ekstruziju polimera u svrhu dobivanja novih polimernih materijala. Na taj način reciklirani materijali koriste se uz dodatak originalnog polimera za primarnu namjenu jer sami ne bi udovoljili pojedinim mehaničkim zahtjevima, a i izgled konačnog proizvoda vrlo je bitan.

Kemijsko recikliranje obuhvaća materijalni oporavak pri kojem se polimerni otpad tretira kemijski ili toplinski sve do polazne sirovine, tj. monomera (López-Fonseca et al. 2010). Kemijsko recikliranje znatno se razlikuje od mehaničkog recikliranja koje daje konačan produkt polimera. Kemijski se mogu oporaviti plastomeri,



duromeri i elastomeri, a najvažniji postupci oporavka su: hidriranje (hidrogenacija), piroliza (termoliza) te rasplinjavanje plastičnog otpada (plinifikacija).

Energetski oporavak polimernog materijala podrazumijeva njegovo spaljivanje i iskorištavanje dobivene energije, a na taj se način obrađuje 13,4 % ukupnog otpada. Energetskim recikliranjem oporabljuje se plastični i gumeni otpad spaljivanjem na roštilju i u vrtložnom sloju, oporavkom u cementnim pećima i toplinskom oporabom uz dodatak mulja. Zbog svoje visoke energetske vrijednosti plastični otpad može zamijeniti ugljen i to do 80 %. Samim time što je energetski oporavak plastike najmanje poželjna opcija, ne znači nužno da će mehaničko i kemijsko recikliranje u potpunosti zamijeniti energetsko recikliranje.

Odlaganje polimernog otpada znači ekonomsku, ali ne i znatnu ekološku štetu, jer je plastični otpad neutralan i pridonosi stabilnosti odlagališta. S obzirom na nerazgradljivost polimernog otpada, na odlagalištima nema emisija plinovitih i kapljevitih onečišćenja, koje su posljedica biorazgradnje materijala u odlagalištu. Budući da se polimerni materijali upotrebljavaju nekih 70-tak godina, još uvijek nema dovoljno informacija o njihovom djelovanju na odlagalištima, osim da pokazuju vrlo male promjene i nakon niza godina.



Slika 2. Balirana PET ambalaža

3. OPORABA PET-a

Tvrtka Drava International d.o.o. iz Osijeka primarno se bavi recikliranjem odnosno oporabom otpadne PE folije i otpadne PET ambalaže. Proces recikliranja u potpunosti je zaokružen u smislu da se otpadna ambalaža sortira i reciklira pri čemu se dobivaju granulirani materijali koji se u daljnjem postupku proizvodnje pretvaraju u gotove proizvode, ovisno o potrebama tržišta. Otpad koji nastaje u postupku recikliranja koristi se kao sirovina za proizvodnju sintetičkog dizela postupkom katalitičke depolimerizacije (Anić Vučinić et al. 2014).

Postrojenje za uporabu ambalaže u navedenoj tvrtki sastoji se od niza povezanih tehnoloških procesa, a može se podijeliti na:

a) uporabu PE folije koja uključuje uporabu i proizvodnju PE folije;

b) uporabu PET ambalaže koja uključuje: uporabu PET ambalaže, proizvodnju PET folije, PET vakuumata, PET pretformi i čepova od polietilena visoke gustoće (HDPE).

Sortiranje otpadne PET ambalaže započinje raspakiravanjem bala otpadne PET ambalaže (Slika 2).

Iz prikupljene ambalaže izdvaja se zaostala folija, žice i papir, a ambalaža se transportnom trakom odvodi do optičke sortirnice koja detektira različite boje PET ambalaže i propuhivanjem sortira ambalažne boce (Slika 3). Ovakav sustav sortiranja ima učinkovitost oko 98 % te je dobra podloga za finu selekciju u narednim etapama proizvodnog procesa.



Slika 3. Linija za sortiranje otpadne PET ambalaže

Otpadna ambalaža sortirana po boji melje se na frakcije dimenzija 8-12 mm u mlinu koji se nalazi u vodi. Samljeveni PET zatim se transportira u centrifugu gdje se cijedi i suši, a mehanički se odvajaju komadići etiketa i nečistoće. Ova faza završava u vertikalnom selektoru koji odvaja etikete (poliolefini) od ostalog materijala, a očišćeni PET listići idu u daljnju obradu.

U daljnjem procesu obrade, PET listići se razdvajaju na temelju specifične težine na dvije frakcije pri čemu jednu frakciju čine materijali lakši od vode (čepovi i druge plastične primjese), a drugu PET, koji tone. Potom se svaka frakcija centrifugira i suši, a u vodenom mediju otapa se zaostalo ljepilo. PET listići zagrijavaju se na 78 °C, pri čemu se u potpunosti odstranjuje ljepilo i ostale nečistoće uz stalno centrifugiranje. Ljepilo se izdvaja, a PET listići idu dalje na ispiranje. Završno čišćenje PET listića odvija se kroz vertikalni zračni selektor, vibracijsku stanicu, magnetni detektor i infracrveni odjeljivač.

U vertikalnom selektoru izbacuju se nečistoće tankih stijenki dok se u vibracijskoj stanici odvajaju PET listići koji po dimenzijama ne odgovaraju željenoj veličini (8-12 mm). Magnetni detektor odvaja zaostale čestice metala, a infracrveni selektor odvaja PET listiće neželjene boje.

Mljeveni prozirni i šareni PET listići (Slika 4) pakiraju se na samoj liniji u „big-bag“ vreće (Slika 5) što predstavlja zadnji korak u mehaničkoj obradi otpadne PET ambalaže. Dio PET listića ide u daljnju proizvodnju PET folije dok se manji dio PET listića dalje procesuiru u proizvodnju PET pretformi i čepova.



Slika 4. Prozirni i šareni listići PET-a



Slika 5. Pakiranje mljevenog PET-a

3.1. Opis procesa proizvodnje PET folije

Sirovina za proizvodnju PET folije reciklirana je PET ambalaža uz originalni granulat, ovisno o tome za koji tip proizvoda će se predmetna folija koristiti. Ukoliko se radi o proizvodnji ambalaže za držanje hrane (PET vakuumati), tada se folija proizvodi samo od originalne sirovine.

PET listići ili originalni granulat iz vreća pomoću transportnih cijevi transportira se do centralnog silosa za miješanje iz kojeg se uređajima i transportnim cijevima dopremaju u dozator, a potom u sam ekstruder. Na isti se način transportira i dozira originalni granulat u pomoćni ekstruder. Ekstruder je opremljen grijačima i sustavom za održavanje konstantne zadane temperature u pojedinim zonama gdje se omekšava PET te se uklanja eventualno zaostala vlaga. Omekšani i pročišćeni PET pomoću transportnog sustava transportira se do filtera gdje se pomoću mrežica čisti od eventualno zaostalih mehaničkih nečistoća te se putem pritiska transportira do diobene glave. U diobenoj glavi materijal se iz osnovnog ekstrudera s gornje i donje strane oblaže novim materijalom. Tako obloženi materijal se pomoću transporter transportira do ravne glave na kojoj se, ovisno o potrebama, određuje širina i debljina folije. Rastaljeni PET pada na prvi valjak sustava za kalandriranje, koji se sastoji od tri valjka, gdje se uz pomoć pritiska dobije određena debljina dok se hlađenjem postiže određena prozirnost. Ohlađena i formirana folija se pomoću vodećih valjaka dovodi do uređaja za kontrolu debljine, a prema potrebi folija se odvodi dalje do sustava za nanošenje silikona. Rezanje na konačan format i namatanje odvija se na namataču folije. Folija namotana na kartonske tuljce pakira se i transportira do kupca ili odlazi na daljnju obradu u pogon za proizvodnju vakuumata.

3.2. Opis procesa proizvodnje PET vakuumata

Proizvodnja PET vakuumata proces je kojim se iz ravne folije dobiva određeni oblik potreban za pakiranje proizvoda. Najčešće se radi o posudicama za pakiranje raznovrsnih prehrambenih proizvoda. PET vakuumati (Slika 6) proizvode se procesom vakuumiranja iz ravne folije pri čemu se dobiva željeni oblik posudica.



Slika 6. PET vakuumat

Ekstrudirana PET folija odmatava se na uređaju za odmatanje PET folije. Razmotana PET folija prolazi kroz uređaj za zagrijavanje u kojem se folija grije na određenu temperaturu (temperatura ovisi o debljini folije, dubini izvlačenja, vrsti folije...). Tako pripremljena folija transportira se do stanice za formiranje. Na stanici za formiranje, koja u sebi ima alat koji se sastoji od donjeg i gornjeg dijela, uz pomoć vakuuma i tlaka zraka, folija se uvlači u otvore za formiranje, pritišće se formiračima, naglo se hladi te izbija van iz alata za formiranje. U stanici za formiranje nastaje i matična folija u manjim količinama koja ide po potrebi u ponovni proces proizvodnje. Formirani oblik transportira se dalje do stanice za izrezivanje konačne forme gdje se ponovno uz pomoć određenih alata odreže željeni oblik. Željeni oblik, koji se još uvijek drži za matičnu foliju, transportira se do stanice za slaganje gdje se iz matične folije alatima izbija i slaže konačna forma u željenim količinama.

Ostaci matične folije nakon izrezivanja željenih formi ponovno se melju i služe kao sirovina u proizvodnji PET folije odnosno u ovom segmentu proizvodnje nema otpada.

3.3. Opis procesa proizvodnje PET pretformi

Tehnološki proces sastoji se od ukupno jedanaest brizgalica, šest brizgalica za PET pretforme dok se ostale koriste za proizvodnju HDPE čepova. PET pretforme dobivaju se postupkom brizganja. Brizganje je proces kojim se dobije određena pretforma iz koje se poslije procesom zagrijavanja i puhanja dobiva određeni oblik i volumen boce od PET-a. Pripremljeni PET se u granulama iz vreća dozira pomoću dozirnog uređaja, a dodatno se u dozator dodaju bojila i aditivi. Pripremljena smjesa ulazi u pužni transporter gdje se zagrijava na određenu temperaturu i transportira do spremnika iz kojeg se pod utjecajem velikih sila, koje omogućuje hidraulični uređaj, ubrizgava u alat. Za svaku pretformu potreban je određeni alat koji daje oblik i željenu formu. Ubrizgana masa u alatu se naglo hladi, alat se otvara pa se uz pomoć izbacivača

stvorena forma izbacuje iz alata i dalje transportnim sustavom transportira do kutija u koje se pakira.

4. ZAKLJUČAK

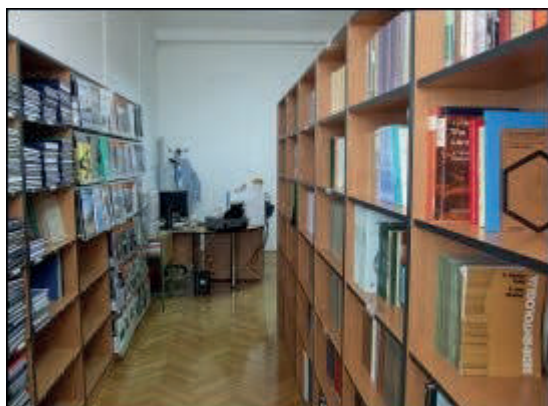
Porastom potrošnje polimernih materijala rastu i količine polimernog otpada kojeg je nužno zbrinuti na prikladan način. Za učinkovito zbrinjavanje otpada potreban je dobro organiziran sustav sortiranja otpada na mjestu nastanka i prikupljanja otpada od lokalnih ovlaštenih poduzeća kako bi se osigurala dovoljne količine polimernog materijala za ekonomski isplativo recikliranje. Postupkom recikliranja i uporabe sirovine nastaju novi proizvodi koji se vraćaju potrošaču.

Poli(etilen-tereftalat), PET, ambalažni je polimerni materijal čija je upotreba i potrošnja u svakodnevnom porastu jer je čvrst, lagan i otporan na udarce, u usporedbi s ostalim ambalažnim materijalima. Tvrtka Drava International d.o.o. iz Osijeka primarno se bavi recikliranjem odnosno uporabom otpadne folije, otpadne PE folije i otpadne PET ambalaže. Proces recikliranja uključuje predobradu i recikliranje otpadne ambalaže pri čemu se dobiva granulirani materijal iz kojeg se daljnjim postupcima proizvodnje dobiva novi gotovi proizvod, ovisno o potrebama tržišta.

5. LITERATURA

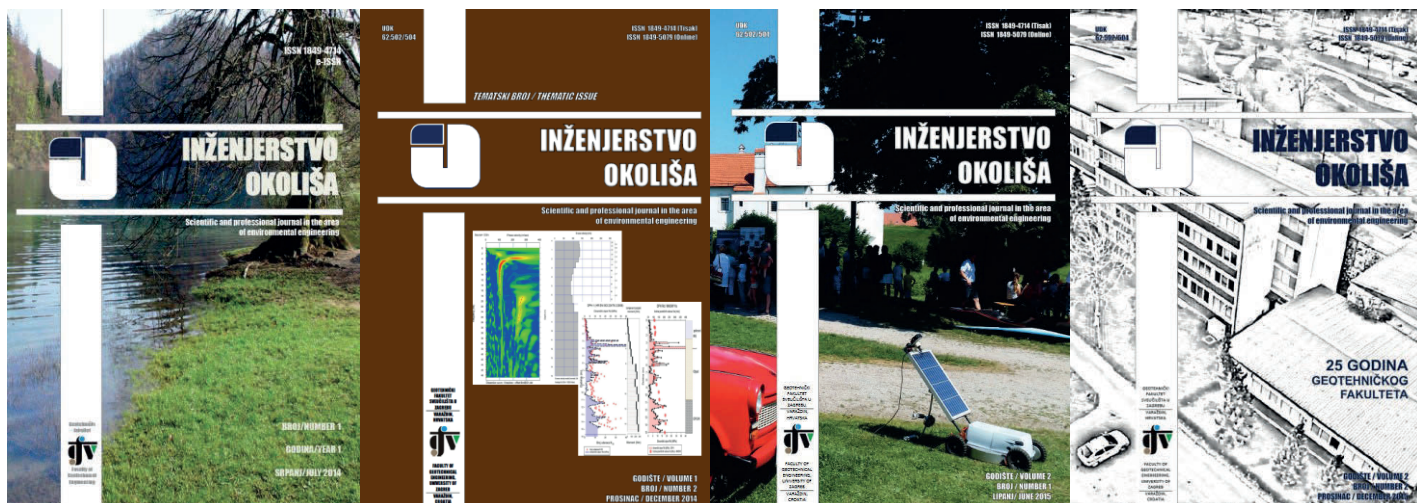
- Anić Vučinić A, Ptiček Siročić A, Vujević D (2014) Tehničko-tehnološko rješenje uporabe otpadne PET i PE ambalaže Drava International d.o.o. Osijek, Zagreb
- Azapagić A, Emsley A, Hamerton I (2003) *Polymers, the Environment and Sustainable Development*. John Wiley & Sons, London
- Barić G (2009) Održivo upravljanje polimernim otpadom. *Polimeri* 30 (3):164-165
- Barriocanal C, Diez MA, Alvarez R (2005) PET recycling for the modification of precursors in carbon materials manufacture. *J Anal Appl Pyrol* 73(1):45-51
- Carraher CE (2003) *Giant molecules*. John Wiley & Sons, New Jersey
- Dimitrov N, Kratofil Krehula Lj, Ptiček Siročić A, Hrnjak-Murgić Z (2013) Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography. *Polym Degrad Stab* 98 (5):972-979
- López-Fonseca R, Duque-Ingunza I, de Rivas B, Arnaiz S, Gutiérrez-Ortiz JI (2010) Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts. *Polym Degrad Stab* 95 (6):1022-1028
- Kratofil Krehula Lj (2010) Recikliranje i modificiranje poli(etilen-tereftalata) reaktivnim ekstrudiranjem, doktorska disertacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb
- Kratofil Krehula Lj, Hrnjak Murgić Z, Katančić Z (2015) *Plastics and Priority during the Recycling*. In: Gaurina-Medjimurec N (ed) *Handbook of Research on Advancements in Environmental Engineering*, Hershey, Pennsylvania
- NN Pravilnik o ambalaži i ambalažnom otpadu, Narodne novine 94/13, 2015
- Ptiček Siročić A, Fijačko A, Hrnjak Murgić Z (2013) Chemical recycling of postconsumer poly (ethylene terephthalate) bottles – depolymerization study. *Chem Biochem Eng Q* 27 (1):65-71
- Šćedrov O, Muratti Z (2008) Pakiranje, ambalaža i zaštita okoliša. *Sigurnost* 50 (3):287-289
- Vilaplana F, Karlsson S (2008) Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: a review. *Macromol Mater Eng* 293:274-97

Knjižnica Geotehničkog fakulteta



Izdavačka djelatnost

Časopis „Inženjerstvo okoliša“



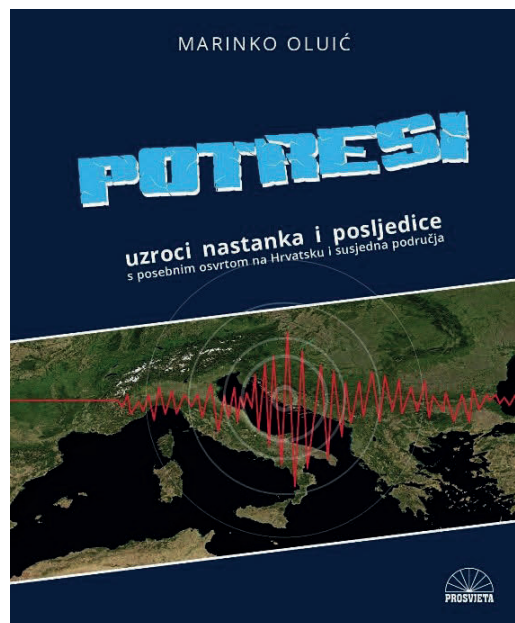
Sveučilišni udžbenici



POTRESI

uzroci nastanka i posljedice s posebnim osvrtom na Hrvatsku i susjedna područja

autor: **Marinko Oluić**
(geo-sat@zg.t-com.hr)
izdavač: **Prosvjeta, Zagreb 2015.**



U ovoj knjizi je autor izložio dugogodišnja vlastita istraživanja koja je tijekom godina nadopunjavao suradnjom sa seizmolozima i primjenjenim geofizičarima. Tema je izuzetno interesantna i bitna za različite segmente društva. Obuhvaća istraživanja u okviru prirodnih znanosti: geofizike (seizmologija i fizika unutrašnjosti Zemlje) i geologije te dijelom tehničkih, polja geodezija i građevinarstvo. Bavi se i djelatnostima iz domene Državne uprave za zaštitu i spašavanje čime se dotiče segmenata nužnih za funkcioniranje društva u slučajevima prirodnih katastrofa. Autor je svojim iskustvom i dosadašnjim radom te istraživanjem obradio uzroke nastanka potresa, njihove posljedice kao i mjere zaštite od potresa kombinirajući pritom klasične metode s metodama daljinskih istraživanja (satelitska snimanja).

Prikupljanjem podataka iz više izvora dobiveni su potpuniji rezultati kako o geologiji (tektonici), tako i o seizmičnosti. Knjiga daje pregled većine saznanja o građi litosfere, nastanku potresa, seizmotektonskoj aktivnosti i seizmičnosti u Hrvatskoj i susjednim područjima, mogućnosti prognoziranja potresa (u kratkoročnoj, srednjeročnoj i dugoročnoj vremenskoj domeni) te se bavi i aktivnostima s ciljem smanjenja potresnog rizika..

Knjiga ima 346 stranica, te brojne tablice i slike u boji. Pisana je na hrvatskom jeziku s proširenim sažetkom na engleskom. Prikazuje raznoliku primjenu tehnika daljinskih istraživanja pri istraživanju potresa: istraživanja prije samog potresa, odmah nakon glavnog potresa te nakon naknadnih potresa. Radi se o multidisciplinarnom djelu koje uključuje geologiju (tektoniku), geofiziku (seizmologiju) te geodeziju i graditeljstvo, kao i djelatnosti koje obavlja Državna uprava za zaštitu i spasavanje.

Sadržaj knjige podijeljen je u tri velike cijeline:

- građa i struktura Zemlje, te analiza seizmičnosti,
- potresi u Hrvatskoj i okolnim zemljama,
- potresi – posljedice i zaštita od njih.

Prva cjelina posvećena je općenito tektonici i seizmotektonici, posebice tektonici ploča kao glavnom uzroku potresa. Zemlja kao planet doživljava, od svog nastanka, konstantne promjene, što se, između ostaloga, očituje kroz prirodne pojave kao što su potresi, tsunamiji, vulkani, ... Otprilike 5 milijuna potresa različite jakosti zatrese Zemlju svake godine. Od toga ih je 18-20 magnituda većih od 7, a oko 100-200 magnituda

između 6 i 7. Tijekom posljednje dekade, potresi i tsunamiji (generirani potresima) su uzrokovali ogromne štete i više od 800 000 poginulih. Glavnina potresa uzrokovana je tektonskim pomacima u zemljinoj unutrašnjosti. Više od 90% svih svjetskih potresa se događa unutar tri seizmički aktivna pojasa. Najaktivniji je cirkumpacifički pojas, koji se proteže duž obala Tihog oceana. Potom slijede, po aktivnosti, mediteransko-transazijski te afričko-atlantski pojas. Na području Mediterana se nalazi seizmotektonski vrlo aktivno područje poznato pod imenom Helenski tektonski luk, a koje se proteže od Turske, južno od Krete prema Jonskom moru. Smatra se da je to jedno od seizmički najaktivnijih područja u Europi. Istočna obala Jadranskog mora također je područje pojačane seizmičke aktivnosti, a kao posljedica podvlačenja Jadranske mikroploče ispod Dinarida.

U drugoj je cjelini opisana seizmičnost Hrvatske i okolnih zemalja, područja koje pripada mediteransko-transazijskom seizmičkom pojasu. Ovdje se u prošlosti dogodilo nekoliko razornih potresa: Dubrovnik (1667), Messina (1908), Skopje (1963), Banja Luka (1969) te Ulcinj (1979). U Hrvatskoj i okolnim područjima je moguće definirati 12 epicentralnih područja s pojačanom seizmičkom aktivnosti, a ista su u knjizi detaljno opisana.

Treća cjelina opisuje posljedice potresa te se naglašava uloga prevencije, posebno primjenom građevinskih propisa i normi koji definiraju standarde u graditeljstvu, posebno na seizmički aktivnim područjima. Sustav ranog uzbunjivanja je vrlo važan segment pri upravljanju katastrofama. Satelitska daljinska istraživanja i GIS omogućuju monitoring Zemlje, pa tako i praćenje prirodnih katastrofa (definiranje njihove prostorne i vremenske dinamike). Visoka rezolucija satelitskih snimaka i preciznost mjerenih podataka, te odgovarajuća računalna interpretacija omogućuju praktičnu operacionalizaciju i široku primjenu. Sustavna daljinska istraživanja Zemlje značajno pomažu razumijevanju globalnih i lokalnih zbivanja na njoj te se mogu koristiti u svim fazama upravljanja i ublažavanja opasnosti. Upravo je nekoliko institucija Ujedinjenih naroda direktno uključeno u primjenu satelitskih snimaka i GIS-a pri sustavu ranog uzbunjivanja (npr. UN-SPIDER i UNISDR).

Veliki značaj ove knjige je u tome što se radi o prvom takvom djelu (tolikog opsega) na hrvatskom jeziku. Autor pažljivo analizira i opisuje odabrane teme, na način koji dovoljno govori o poznavanju promatrane problematike. Od osobitog je značaja kombiniranje klasičnih metoda i metoda daljinskih istraživanja, što je doprinijelo novim saznanjima o tektonici (izuzetno važno pri istraživanju seizmotektonike i seizmičnosti, a što su glavni preduvjeti za opis seizmičke ugroženosti i opasnosti).

Knjiga može korisno poslužiti geolozima, geofizičarima, geodetima, građevinarima, arhitektima, ekolozima, vojnim stručnjacima i drugim znanstvenicima sličnih područja u njihovom istraživačkom i praktičnom radu. Također i svima koji se profesionalno bave upravljanjem katastrofama (seizmolozi, geofizičari, geolozi, građevinari, ...), te djelatnicima radne skupine Državne uprave za zaštitu i spašavanje. Zbog sustavnog i jasnog iznošenja knjiga može poslužiti i kao priručnik studentima odgovarajućih studija. Budući da se radi o multidisciplinarnom i zanimljivom sadržaju za očekivati je da će knjiga naići na odziv i kod šireg kruga čitateljstva te na taj način pomoći u podizanju opće svijesti o poimanju potresa i opasnosti od njih u svim strukturama društva.

Doc.dr.sc. Snježana Markušić



IN MEMORIAM
doc.dr.sc. Dinko Vujević

Dragi kolega, doc. dr. sc. Dinko Vujević, bio je sa nama na Geotehničkom fakultetu od 1. listopada 2011. godine.

Ipak, u tom relativno kratkom vremenu njegov znanstveno-nastavni doprinos razvoju Fakulteta ogleda se u brojnim znanstvenim radovima, pozivnim predavanjima i tribinama iz područja Inženjerstva i zaštite okoliša. Posebni znanstveni interes posvetio je procesima za smanjenje otpada organske kemijske industrije.

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije na Sveučilištu u Zagrebu završio je u studenom 1998. godine. Na istom Fakultetu magistrirao je u rujnu 2003., a doktorirao u ožujku 2007. godine.

Prije dolaska na naš Fakultet, stjecao je radno iskustvo u tvrtki OIKON, Institutu za primijenjenu ekologiju, kao suradnik u Zavodu za zaštitu okoliša, te na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije, kao znanstveni novak – mlađi asistent, asistent i viši asistent.

Posebno dobar odnos na našem Fakultetu kolega Dinko je uspostavio sa studentima. Nije pretjerano reći da su ga oni obožavali. Rado su posjećivali njegova nadahnutna predavanja, a pred završetak studija mnogi od njih su upravo njega izabirali za mentora završnih i diplomskih radova. Bio je mentor na 10 završnih i 9 diplomskih radova. Od radova koje je objavio sa studentima dva su nagrađena rektorovom, a dva dekanovom nagradom.

Često je bio voditelj odnosno moderator različitih stručnih i znanstvenih skupova. Posebno ga je veselilo vođenje svečanih sjednica povodom Dana Fakulteta koncem prosinca svake godine. Tu ulogu obavljao je savršeno. Nije ni čudo, jer kolega Dinko bio je i kazališni i televizijski glumac te dugogodišnji član Studentskog kazališta Ivan Goran Kovačić.

Neki ljudi s razlogom ulaze u naše živote. Ti si u naš život ušao kao blagoslov, na tebe smo se mogli uvijek osloniti i računati. Ostavio si nas bogatijima za jedno prekrasno prijateljstvo, ostavio si nas u spoznaji da takva osoba postoji, a Tvoj odlazak stvorio je nemjerljivu prazninu koja će se teško popuniti.

Hvala ti na svemu, Dinko. Počivaj u miru!

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 Times New Roman 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 s naslovom i uključeni na odgovarajuće mjesto u članku. **Navoditi jednadžbe, slike i tablice u tekstu podebljanim fontom.** 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 plavom bojom** 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 A4 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 Times New Roman, 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. **For citation of equations, figures and table in text use bold font.** 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** with **blue colour**, 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.