

UDK  
62.502/504

ISSN 1849-4714 (Tisak)  
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 5  
BROJ / NUMBER 1-2  
PROSINAC / DECEMBER 2018

## 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](mailto:casopis@gfv.hr), URL: <http://www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html>

### Glavni urednik/Editor in Chief:

Prof. dr. sc. Stjepan Strelec, [stjepan.strelec@gfv.hr](mailto:stjepan.strelec@gfv.hr)

### Urednički odbor/Editorial board:

Izv. prof. dr. sc. Aleksandra Anić Vučinić, [aav@gfv.hr](mailto:aav@gfv.hr)  
 Prof. dr. sc. Andrea Bačani, [andrea.bacani@rgn.hr](mailto:andrea.bacani@rgn.hr)  
 Prof. emeritus Božidar Biondić, [bbiondic@gfv.hr](mailto:bbiondic@gfv.hr)  
 Prof. dr. sc. Ranko Biondić, [rbiondic@gfv.hr](mailto:rbiondic@gfv.hr)  
 Prof. dr. sc. Mladen Božičević, [mladen.bozicevic@gfv.hr](mailto:mladen.bozicevic@gfv.hr)  
 Doc. dr. sc. Sanja Kalambura, [sanja.kalambura@vvg.hr](mailto:sanja.kalambura@vvg.hr)  
 Prof. dr. sc. Sanja Kapelj, [sanja.kapelj@gfv.hr](mailto:sanja.kapelj@gfv.hr)  
 Doc. dr. sc. Boris Kavur, [boris.kavur@gfv.hr](mailto:boris.kavur@gfv.hr)  
 Prof. emeritus Natalija Koprivanac, [nkopri@fkit.hr](mailto:nkopri@fkit.hr)  
 Prof. dr. sc. Davorin Kovačić, [kovacic.geoekspert@gmail.com](mailto:kovacic.geoekspert@gmail.com)  
 Prof. dr. sc. Urška Lavrenčič Štangar, [\(Slovenia\)](mailto:urska.lavrencic@ung.si)  
 Prof. dr. sc. Jakob Likar, [\(Slovenia\)](mailto:jakob.likar@ogr.ntf.uni-lj.si)

Izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić, [markusic@irb.hr](mailto:markusic@irb.hr)  
 Prof. dr. sc. Josip Mesec, [jmesec@gfv.hr](mailto:jmesec@gfv.hr)  
 Izv. prof. dr. sc. Anita Ptiček Siročić, [anitaps@gfv.hr](mailto:anitaps@gfv.hr)  
 Doc. dr. sc. Milan Rezo, [mrezo@gfv.hr](mailto:mrezo@gfv.hr)  
 Izv. prof. dr. sc. Zvjezdana Stančić, [zvjezdana.stancic@gfv.hr](mailto:zvjezdana.stancic@gfv.hr)  
 Doc. dr. sc. Radmila Šalić, [\(Macedonia\)](mailto:r_salici@pluto.iziis.ukim.edu.mk)  
 Dr. sc. Josip Terzić, [josip.terzic@hgi-cgs.hr](mailto:josip.terzic@hgi-cgs.hr)  
 Prof. emeritus Ivan Vrkljan, [ivan.vrkljan@igh.hr](mailto:ivan.vrkljan@igh.hr)  
 Prof. dr. sc. Sabid Zekan, [\(Bosnia and Herzegovina\)](mailto:sabid.zekan@untz.ba)  
 Izv. prof. dr. sc. Mladen Zrinjski, [mzrinski@geof.hr](mailto:mzrinski@geof.hr)  
 Doc. dr. sc. Željka Zgorelec, [zzgorelec@agr.hr](mailto:zzgorelec@agr.hr)

### Tehnički urednici/Technical board:

Doc. dr. sc. Hrvoje Meaški, [hmeaski@gfv.hr](mailto:hmeaski@gfv.hr)  
 Doc. dr. sc. Bojan Đurin  
 Dr. sc. Davor Stanko, mag. phys.

### Tiskar/Printed by:

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

### Naklada/Edition:

200 primjeraka/200 copies

**Časopis izlazi dva puta godišnje. Svi radovi objavljeni u časopisu su recenzirani od strane neovisnih recenzenata. Journal is published biannually. All papers published in journal have been reviewed.**

**Časopis je referiran/Journal is referred in: Hrčak – Portal znanstvenih časopisa RH, Chemical Abstracts Service Source Index (CASSI).**

**Svi cjeloviti radovi su besplatni i dostupni na web stranici <http://www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html>  
 The full text of all articles is available for free at the web site <http://www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html>**

**ISSN 1849-4714 (Tisak)**

**ISSN 1849-5079 (Online)**

**UDK 62:502/504**

**Naslovna slika / Journal cover photo:** Copernicus satellite mission, autor Nikola Kranjčić.

Poštovano čitateljstvo,

pred vama je novi broj časopisa Inženjerstvo okoliša VOL 5 / No. 1-2. U ovom dvobroju i dalje nastojimo u publiciranim člancima održati interdisciplinarnost. Časopisom omogućujemo uključivanje studenata u znanstveno-istraživački i stručni rad na način da objavljaju radove u sinergiji s mentorima. Zajedničkim naporom nastavnika i studenata nastavlja se kontinuitet izdavanja članaka koji ukazuju na suradnju te znanstveno istraživački rad na našem fakultetu. Radovi u ovom broju tematikom su vezani za problematiku inženjerstva okoliša u sklopu geoinženjerstva, upravljanjem vodama te okoliša. U svim radovima nalazi se poveznica s granom inženjerstva okoliša.

U ovom broju teme su:

- UTJECAJ EKSTREMNIH ODSTUPANJA U KOLIČINAMA PADALINA NA RAZINE PODZEMNIH VODA DUBOKOG KVARTARNOG VODONOSNIKA
- POJEDNOSTAVLJENI POSTUPAK ODABIRA OPTIMALNE VARIJANTE VODOOPSKRBNOG SUSTAVA POKRETANOG SOLARNOM FOTONAPONSKOM (FN) ENERGIJOM
- UTJECAJ NOVE REGULATIVE EU ZA KORIŠTENJE BESPILOTNIH LETJELICA NA TEHNOLOGIJE KARTIRANJA I NADZORA PLINOVODA
- KVANTIFIKACIJA INDICIRANOG GEOTERMALNOG POTENCIJALA RH ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE
- PROCJENA FAKTORA POBOLJŠANJA TLA PRIMJENOM MASW-A

Radovi studenata i njihovih mentora nalaze se u sljedećim naslovima:

- FOTOKATALITIČKA OKSIDACIJA TRGOVA HERBICIDA U ZRAKU
- SATELITSKA MISIJA COPERNICUS – MOGUĆNOSTI NADZIRANJA PRIRODNIH NEPOGODA
- NUMERIČKO RJEŠAVANJE I VIZUALIZACIJA RJEŠENJA LAPLACEOVE JEDNADŽBE
- PROCESI ISHOĐENJA LOKACIJSKE DOZVOLE ZA PROJEKT PODRAVSKE BRZE CESTE
- USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA

Srdačno Vas pozivamo da nam se pridružite sa svojim radovima kako bismo održali kontinuitet izdavanja i u narednim godinama te unaprijed zahvaljujemo svima koji će časopis INŽENJERSTVO OKOLIŠA prepoznati kao mjesto prezentiranja svojih rezultata istraživanja.

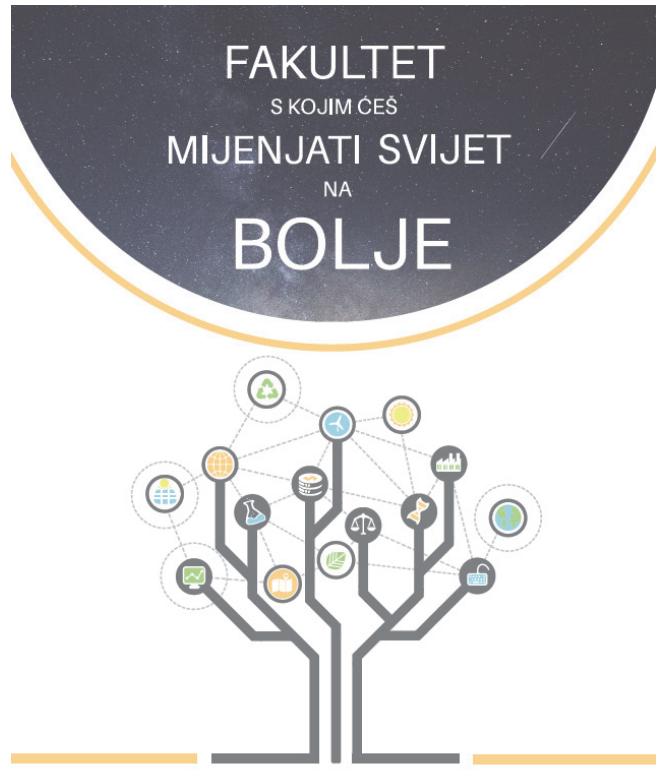
Časopis Inženjerstvo okoliša izlazi dva puta godišnje, a osim u tiskanom izdanju, časopis se izdaje i u elektroničkom obliku, on-line izdanju, koje se može preuzeti na mrežnoj stranici časopisa: [www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html](http://www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html).

Citat časopisa Inženjerstvo okoliša možete pronaći u Chemical Abstracts Service Source Indeks (CASSI) koja nudi bibliografske podatke o publikacijama citiranim u međunarodnoj Chemical Abstract bazi podataka.

Uredništvo časopisa Inženjerstvo okoliša



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
Geotehnički fakultet  
Hallerova aleja 7, Varaždin



## Zašto studirati Inženjerstvo okoliša na Geotehničkom fakultetu?

S našeg fakulteta izlaze inženjeri zaštite okoliša. Kroz preddiplomski i diplomski studij inženjerstva okoliša studenti stječu kompetencije iz područja gospodarenja otpadom, zaštite okoliša, zaštite voda, geotehnike, zelene energije i cirkularne ekonomije te otvaraju vrata u područje tzv. zelenih poslova.

Sama nastava koncipirana je na baznim znanjima iz temeljnih prirodnih, tehničkih i informatičkih znanosti koja su predviđeni za razumijevanje osnovnih načela inženjerstva okoliša; inovativnim rješenjima i završava obaveznom stručnom praksom u trajanju od 160 sati, čime studenti rano dolaze u priliku primjeniti naučeno.

U recenziji je upućen i doktorski studij inženjerstvo okoliša (prvi takav u Hrvatskoj) koji nastoji interdisciplinarno povezati teme zaštite voda, tla, zraka, gospodarenje otpadom i energetike.

## Preddiplomski studijski program Inženjerstvo okoliša

Preddiplomski sveučilišni studij inženjerstva okoliša traje tri godine, tijekom kojih se stječu znanja iz temeljnih prirodnih, tehničkih i informatičkih znanosti kao preduvjet za razumijevanje osnovnih principa inženjerstva okoliša, koji uključuju znanja iz zaštite okoliša, gospodarenja otpadom te ostalih mjera i postupaka u zaštiti okoliša.

Na taj način student tijekom studija razvija sposobnost prepoznavanja i opisivanja različitih problema u inženjerstvu okoliša, sposobnost usvajanja najkvalitetnijih rješenja u struci, sposobnost korištenja laboratorijske i terenske opreme, promatranja, bilježenja i analize podataka doblivenih laboratorijskim i terenskim ispitivanjima.

## Diplomski studijski program Inženjerstvo okoliša

Kroz diplomski studijski program studenti detaljnije ulaze u problematiku inženjerstva okoliša kroz tri studijska usmjerenja:

- Geolinženjerstvo okoliša omogućava sudjelovanje u planiranju, projektiranju, organiziranju i izvođenju poslova na projektima i studijama: očuvanja, nadzora, zaštite i remedijacije okoliša, procjene utjecaja planiranih zahvata na okoliš, istraživanja terena u okolišne i geotehničke svrhe kao i stručnih poslova u niskogradnji i rudarstvu.
- Upravljanje vodama obrađuje problematiku vodnih resursa, gdje se podjednaka težina daje količini i kakvoći vode za piće, problematiki otpadnih voda, njihovoj dispoziciji i remedijaciji, složenom području energetskog iskoristavanja vodnih potencijala te melloracijskim sustavima i regulacijama vodotoka.
- Upravljanje okolišem interdisciplinarni je smjer koji obuhvaća inženjerski pristup u identificiranju, sprječavanju i ublažavanju nepovoljnih utjecaja na okoliš. Širok spektar znanja omogućava rješavanje niza okolišnih izazova poput gospodarenja otpadom, energetske tranzicije, remedijacije tla, procjene životnog vijeka proizvoda, procjene utjecaja na okoliš, inspekcijskog nadzora u zaštiti okoliša i sl.



## S A D R Ž A J – C O N T E N T

<p><b>Željko Duić, Jasna Zima, Barbara Rajič</b></p> <p><b>UTJECAJ EKSTREMNIH ODSTUPANJA U KOLIČINAMA PADALINA NA RAZINE PODZEMNIH VODA DUBOKOG KVARTARNOG VODONOSNIKA</b></p> <p>THE EFFECT OF EXTREME DIFFERENCES IN THE QUANTITY OF RAINFALL ON GROUNDWATER LEVELS IN DEEP QUATERNARY AQUIFER</p>	<p>7</p>
<p><b>Elizabeta Radetić, Lucija Radetić, Ivana Melnjak, Ivana Grčić</b></p> <p><b>FOTOKATALITIČKA OKSIDACIJA TRAGOVA HERBICIDA U ZRAKU</b></p> <p>PHOTOCATALYTIC OXIDATION OF TRACE HERBICIDES IN AIR</p>	<p>17</p>
<p><b>Bojan Đurin</b></p> <p><b>POJEDNOSTAVLJENI POSTUPAK ODABIRA OPTIMALNE VARIJANTE VODOO-PSKRBNOG SUSTAVA POKRETANOG SOLARNOM FOTONAPONSKOM (FN) ENERGIJOM</b></p> <p>SIMPLIFIED PROCEDURE OF SELECTION OF THE OPTIMUM VARIANT OF WATER SUPPLY SYSTEM POWERED BY SOLAR PHOTOVOLTAIC (PV) ENERGY</p>	<p>27</p>
<p><b>Lucija Jakopović, Miljenka Kolarek, Milan Rezo, Nikola Kranjčić</b></p> <p><b>SATELITSKA MISIJA COPERNICUS – MOGUĆNOSTI NADZIRANJA PRIRODNIH NEPOGODA</b></p> <p>SATELLITE MISSION COPERNICUS – POSSIBILITY OF NATURAL HAZARD MONITORING</p>	<p>41</p>
<p><b>Darko Pavlović, Antonijo Bolanča, Miroslav Golub</b></p> <p><b>UTJECAJ NOVE REGULATIVE EU ZA KORIŠTENJE BESPILOTNIH LETJELICA NA TEHNOLOGIJE KARTIRANJA I NADZORA PLINOVODA</b></p> <p>INFLUENCE OF NEW EU REGULATION FOR USE OF UNMANNED AIRCRAFT IN MAPPING AND GAS PIPELINE MONITORING</p>	<p>51</p>
<p><b>Slobodan Kolbah, Mladen Škrlec, Miroslav Golub</b></p> <p><b>KVANTIFIKACIJA INDICIRANOG GEOTERMALNOG POTENCIJALA RH ZA PROIZVODNJIJU ELEKTRIČNE ENERGIJE</b></p> <p>QUANTIFICATION OF INDICATED GEOTHERMAL RESOURCES IN CROATIA FOR ELECTRICITY PRODUCTION</p>	<p>61</p>
<p><b>Filip Strelec, Ivan Hip, Igor Petrović</b></p> <p><b>NUMERIČKO RJEŠAVANJE I VIZUALIZACIJA RJEŠENJA LAPLACEOVE JEDNADŽBE</b></p> <p>NUMERICAL SOLVING AND VISUALIZATION OF SOLUTION OF LAPLACE EQUATION</p>	<p>69</p>
<p><b>Filip Dodigović, Kristijan Grabar, Krešo Ivandić, Stjepan Strelec</b></p> <p><b>PROCJENA FAKTORA POBOLJŠANJA TLA PRIMJENOM MASW-A</b></p> <p>ASSESSMENT OF SOIL IMPROVEMENT FACTOR USING MASW</p>	<p>83</p>
<p><b>Paula Benjak, Milan Rezo, Nikola Kranjčić</b></p> <p><b>PROCESI ISHOĐENJA LOKACIJSKE DOZVOLE ZA PROJEKT PODRAVSKE BRZE CESTE</b></p> <p>PROCESSES OF OBTAINING LOCATION PERMIT FOR PODRAVSKA HIGHWAY PROJECT</p>	<p>93</p>
<p><b>Ivana Petrinjak, Damir Štuhec, Goran Jeftić, Stjepan Strelec</b></p> <p><b>USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA</b></p> <p>COMPARISON OF DIFFERENT METHODS FOR DETERMINING THE COEFFICIENT OF PERMEABILITY OF NON-COHESIVE SOIL</p>	<p>99</p>



STUDIJ  
INŽENJERSTVA  
OKOLIŠA



# Dan otvorenih vrata

TRAVANJ  
2019

# Geotehničkog fakulteta



STUDIJ  
INŽENJERSTVA  
OKOLIŠA

# UTJECAJ EKSTREMNIH ODSTUPANJA U KOLIČINAMA PADALINA NA RAZINE PODZEMNIH VODA DUBOKOG KVARTARNOG VODONOSNIKA

## THE EFFECT OF EXTREME DIFFERENCES IN THE QUANTITY OF RAINFALL ON GROUNDWATER LEVELS IN DEEP QUATERNARY AQUIFER

Željko Duić<sup>1\*</sup>, Jasna Zima<sup>2</sup>, Barbara Rajić<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> Vodovod Osijek, Poljski put 1, 31000 Osijek, Hrvatska

\*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: zeljko.duic@rgn.hr

**Sažetak:** U radu su dani podaci višegodišnjeg praćenja razina u dubokom kvartarnom vodonosniku izražene heterogenosti iz kojeg se zahvaćaju značajne količine vode. Obradeni podaci su prikupljeni tijekom rada crpilišta Vinogradi u Osijeku, za koje postoje pouzdani podaci o njegovom radu, te uhodan sustav monitoringa. Kako je mehanizam obnavljanja podzemnih voda, definiran ranijim istraživanjima, dominantno pod utjecajem padalina, u ovom radu analiziran je utjecaj ekstremnih odstupanja u godišnjim količinama padalina (koji se zapaža naročito zadnjih 10-15 godina) na razine podzemne vode. Kako se crpne količine na godišnjoj razini vrlo malo mijenjaju, a podaci o razinama podzemne vode ne pokazuju izrazito velike amplitude čak niti kod najvećih odstupanja u količinama oborine od dugogodišnjih srednjih vrijednosti zaključeno je kako ovakav tip vodonosnika predstavlja vrlo značajan vodni resurs. Zbog toga u budućnosti posebnu pozornost treba posvetiti kontinuiranom monitoringu, te očuvanju prirodne kakvoće podzemne vode.

**Ključne riječi:** hidrogeologija, crpilište, opažanja, Osijek, Hrvatska.

**Abstract:** In this paper, data are provided for a long-term monitoring of groundwater levels in the deep quaternary aquifer of expressed heterogeneity from which significant quantities of water are extracted. The processed data were collected during the operation of the Vinogradi wellfield in Osijek, for which reliable data on its operation and a high quality monitoring system exists. As the groundwater recharge mechanism, defined by earlier researches, is dominantly influenced by precipitation, this paper analyzes the impact of extreme deviations in annual precipitation volumes (which has been particularly evident for the last 10-15 years) at groundwater levels. Since pumping volumes on the annual level vary slightly, and the data on groundwater levels do not show very large amplitudes, even with the largest deviations in precipitation amounts from long-term mean values, it is concluded that this type of aquifer represents a very significant water resource. For this reason, special attention should be paid to continuous monitoring and the preservation of natural groundwater quality.

**Keywords:** hydrogeology, wellfield, monitoring, Osijek, Croatia

Received: 14.03.2018. / Accepted: 27.08.2018.

Published online: 17.12.2018.

Znanstveni rad / Scientific paper

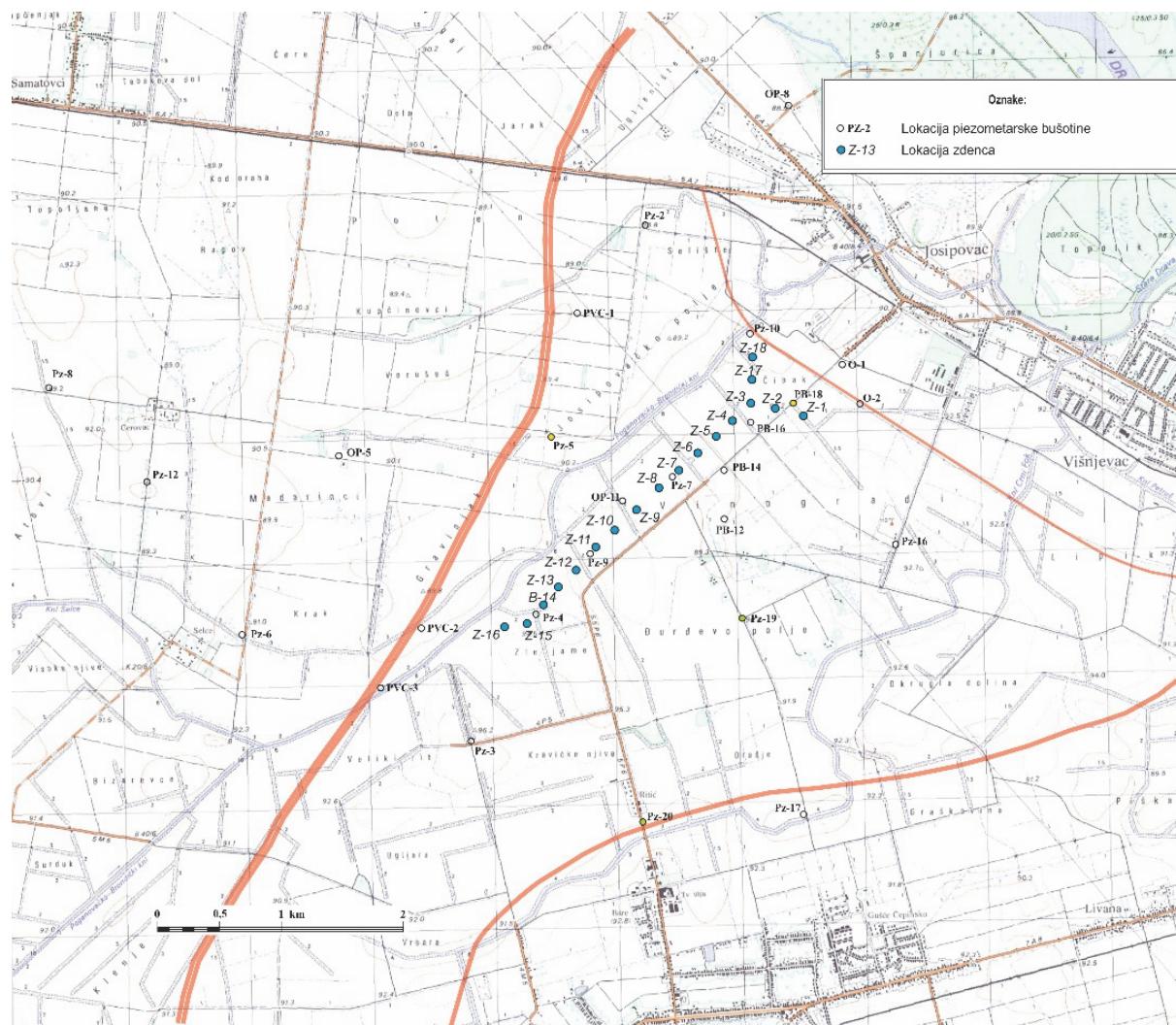
### 1. UVOD

Početak 21. stoljeća u okolišnom smislu obilježila je tema o globalnoj promjeni klime koja je postupno zamijenila sintagmu globalno zatopljenje. Postoje dva aspekta s kojih se promatra i raspravlja o toj temi, jedan je društveni, socio-ekonomsko-politički, a drugi je vezan uz egzaktna praćenja prirodnih pojava i prognoze njihovih promjena u budućem razdoblju. Opsežna literatura koja se spomenutom tematikom bavi ukazuje da zabilježena pojava klimatskih promjena, iako općeprihvaćena kako u znanstvenim, stručnim krugovima tako i u široj javnosti, ukazuje na postojanje neslaganja u opsegu (EEA 2017) pa čak i trendu tih promjena (Zaninović et al. 2008; DHMZ 2013).

U ovom radu pažnja je usmjerena na podzemne vode kao jedan od najvažnijih segmenata ekosustava, preciznije na odraz zabilježenih ekstremnih hidrometeoroloških uvjeta (izmjena izrazito vlažnih sa izrazito suhim i vrućim sezonomama) na razine podzemne vode u dubokom aluvijalnom kvartarnom vodonosniku kakav je zahvaćen za potrebe javne vodoopskrbe na osječkom crpilištu Vinogradi. Radi se o najvećem crpilištu u Republici Hrvatskoj gdje je voda zahvaćena iz pješčanih vodonosnika. Na njemu je zahvaćen kompleks vodonosnih naslaga vrlo izražene heterogenosti i relativno niske hidrauličke vodljivosti, a iz kojeg se crpe količine od oko 450 l/s. Za spomenuto područje provedena su opsežna istraživanja, te se sustavno bilježe podaci o radu crpilišta Vinogradi i stanju razina podzemnih voda u njegovom okruženju.

## 2. GEOLOŠKO-HIDROGEOLOŠKI ODNOSI I KLIMATSKI POKAZATELJI PODRUČJA

Istraživano područje pripada istočnom, pretežito nizinskom dijelu Republike Hrvatske. Nalazi se u Osječko-baranjskoj županiji, udaljeno 10 km od grada Osijeka. Područje je smješteno na desnoj obali rijeke Drave, koja je imala glavnu ulogu u oblikovanju recentnog reljefa, te je građeno od mlađih riječnih naplavina i praporastih taložina. Crpilište Vinogradi se nalazi na samom razvodu između Poganovačko-Brodničkog kanala i Crnog Foka. Između najznačajnijih pritoka rijeke Drave na ovom području, rijeke Vuće te Karašice s najvećim pritokom Vućicom, je široko područje spletka kanala koji se dreniraju u Poganovačko-Brodnički kanal. Kanal se proteže od Čepinskog Martinaca do Josipovca gdje se ulijeva u staru Dravu. Crpilište Vinogradi se sastoji od niza 18 zdenaca. Linija zdenaca slijedi kanal na udaljenosti od 200 do 500 m od samog kanala (**Slika 1**).



**Slika 1.** Položaj eksploracijskih zdenaca i piezometara na crpilištu Vinogradi

Površinski promatrano, geološka građa je vrlo jednolična kako kronostratigrafski jer su to sve najmlađe naslage koje pripadaju holocenu i najmlađem pleistocenu, tako i litološki jer su na površini uglavnom glina, prah i pijesak koji se pojavljuju u mješavini i izmjeni. Ipak, i površinski ima sustavnih diferencijacija kako u morfološkom tako i u litostratigrafskom smislu.

Analizom podataka o ovim buštinama prikupljenim u cijelom području sjeverne Hrvatske Urumović et al. (1976) uočavaju dva kontrastna dijela u inače općoj izmjeni sitno i krupno klastičnih sedimenata. Granicu među njima označavaju uvjetnim markerom Q'. Kao značajke gornjega dijela naslaga ističu nekonsolidiranost materijala, relativno visoki udjel propusnih gruboklastičnih slojeva i sadržaj slatkih voda. Ispod markera Q' stupanj konsolidacije je veći, udjel propusnih, gruboklastičnih slojeva je smanjen i znatne su razlike u mineralizaciji slojnih voda kako po vertikali tako i horizontali, a mineralizacija vode je općenito povišena u odnosu na gornji dio jedinice. Naslage iznad markera Q' Urumović et al. (1976, 1978) pripisuju srednjem i gornjem pleistocenu, te

holocenu, a one ispod donjem pleistocenu i pliopleistocenu. Činjenica da iznad repera Q' nastupa slijed naslaga u kojima regionalno dominiraju gruboklastične taložine navodi na zaključak da su oni posljedica regionalnih promjena u kvaliteti taloženoga materijala uzrokovanoj promjenom paleoklimatskih uvjeta.

U cjelini kvartarnih naslaga iznad markera Q' pojavljuje se još jedan kontrast u litološkom razvitu sličan onome na razini Q'. Na regionalnom koreacijskom profilu označen je markerom X (**Slika 2**). Iznad njega slijede najgrublje taložine u cijeloj regiji istočnoga dijela Dravske depresije ([Urumović 1982](#)). Neposredno iznad ovoga markera zapažaju se pojedinačne sitne valutice šljunka na većem dijelu područja. Stječe se dojam da ove naslage predstavljaju posljedicu snažne transgresije širokih razmjera kada u Baranji, u inundacijskom dijelu Podunavlja, dolazi do taloženja naslaga šljunka debelih do 50 m. Na ovom su nivou jugoistočno od Osijeka na 60 m dubine, u sloju pjeska, nabušeni oblutci gnajs-granitnih stijena promjera do 120 mm. Dimenzije valutica su izuzetne za ove predjele, no pojava sitnih valutica šljunka registrirana je i na brojnim drugim bušotinama, a i elektrokarotažne korelacije potvrđuje regionalni karakter pojave koja je rezultirala s taloženjem najgrubljih taložina ovih predjela.

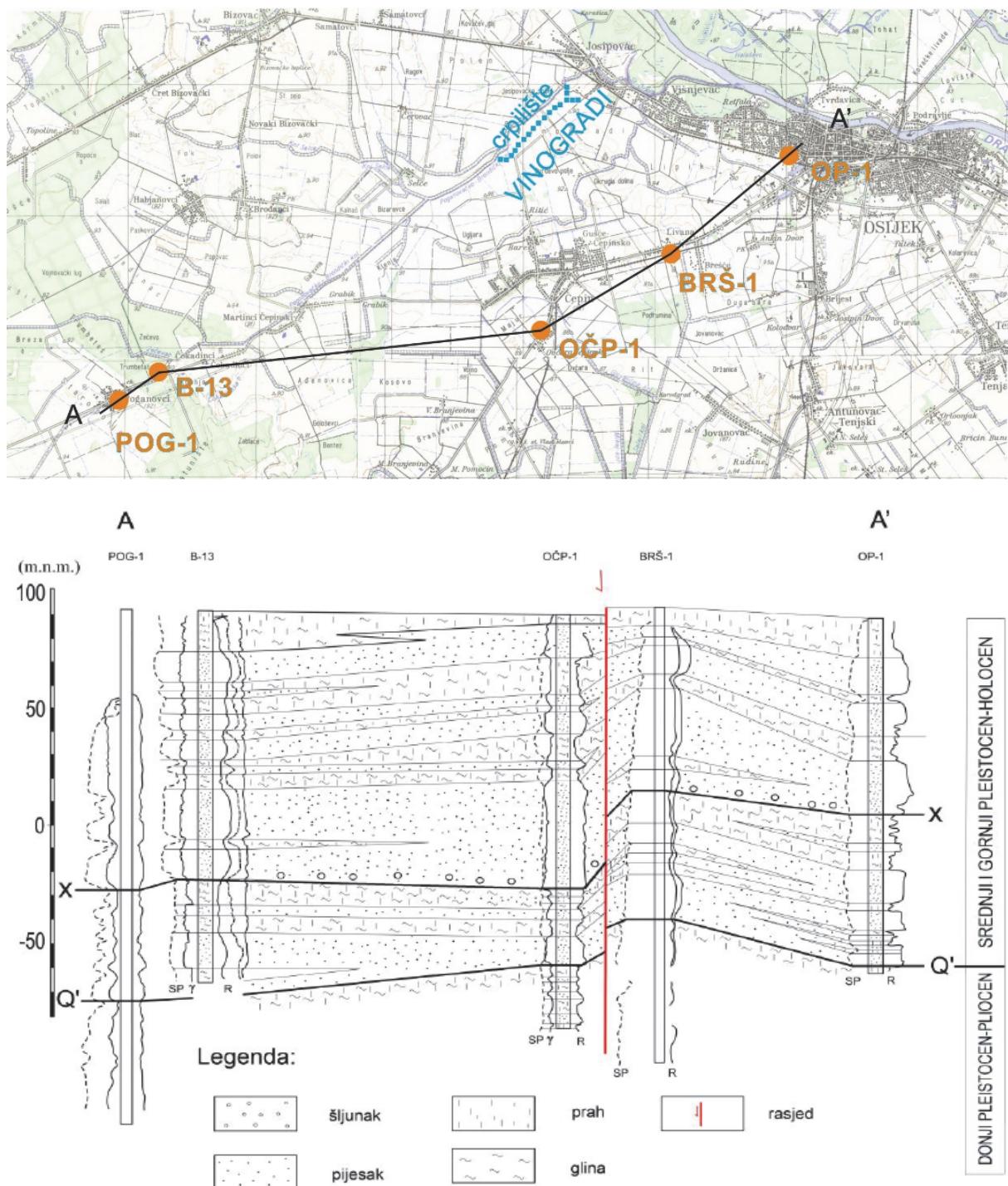
Gruboklastični materijali su u širem području crpilišta Vinogradi pretežito predstavljeni jednoličnim pijescima srednjega do sitnoga zrna veličine od 0,05 do 0,3 mm. To su pretežito zrnca kvarca udjel kojega doseže do 85%. U sitnozrnastim pijescima značajan je udio tinjaca, ponekad do te mjere da svojim bljeskanjem u bušotinskoj jezgri daju privid krupnijega zrna od stavnog. U mineralnom sastavu pjesaka također se pojavljuju odломci karbonatnih stijena, feldspati, amfiboli, epidot i granati, prema kojima se zaključuje da su izvorišne stijene dominantno bili masivi Alpa, a u podređenoj mjeri slavonskih planina.

Sitnoklastični materijali predstavljeni su prahom, pjeskovitim prahom, te prahovitim do masnim glinama. Boje su sive, sivoplave do zelenkaste. U njima se često pojavljuju konkrecije kao fragmenti, oštrobridni do slabo zaobljeni, obično svjetosive do zelenkaste i bjeličaste, vagnene boje. Za razliku od slojeva praha i gline koji su vlažni, nakupine konkrecija su obično sukcijski isušene, pa na elektrokarotažnim dijagramima ponekad pokazuju kontrastan otklon. U mineralnom sastavu redovito prevladavaju zrna kvarca, a nešto su podređeni tinjčasti minerali, zatim dolaze feldspati. U pojedinim dijelovima pojavljuje se značajan sadržaj kalcita, naročito u česticama iznad 0,06 mm, a među sitnjim montmorilonit doseže do 10 %.

Obnavljanje podzemnih voda u ovim predjelima je pod dominantnim utjecajem vertikalnih faktora bilance. Površinski tokovi ovdje predstavljaju, naime, najnižu piezometarsku razinu i prema tome trasiraju mesta pražnjenja podzemnih voda u prirodnim uvjetima. Inverzna situacija događa se povremeno u inundacijskom području Drave i Dunava i to u vrijeme njihovih visokih vodostaja.

Vrijednost poniranja padalina istraživana je u ovim i susjednim područjima u više navrata. Prema ranijim analizama, iznos prosječne godišnje infiltracije padalina kreće se oko 14 do 16% visine godišnjih padalina. Obnavljanje podzemnih voda u dubljim vodonosnim slojevima odvija se procjeđivanjem kroz polupropusne međuslojeve iz vodonosnika s višom, prema vodonosniku s nižom piezometarskom razinom. Pražnjenje vodonosnog sustava uvjetovano je evapotranspiracijom, drenažom duž površinske hidrografske mreže i eksploatacijom ([Duić 2007, Urumović et al, 2011](#)).

Bilanca voda u izvornom sloju je, dakle, diktirana prinosima od poniranja padalina i davanjem prema kaptiranom vodonosniku. Utjecaj osciliranja ovih ulaza i izlaza na kaptirani vodonosnik prigušen je promjenom zaliha podzemnih voda u izvornom sloju, a opći pad razine podzemnih voda uzrokovani intenzivnom eksploatacijom, uvjetuje reduciranje vanjskog pražnjenja podzemnih voda (evapotranspiracija i drenaža duž površinske hidrografske mreže).



Slika 2. Regionalni korelacijski profil kvartarnih naslaga istraživanog područja  
(prema Urumović et al., 1978)

### 3. KORIŠTENI PODACI

#### 3.1. Crpne količine zahvaćene eksplotacijskim zdencima na crpilištu Vinogradi

Na crpilištu Vinogradi zahvaćeni su vodonosni slojevi u dubinskom intervalu od 40 do 176 m. Crpne količine registriraju se na pojedinim zdencima i sumarno za cijelokupno crpilište. U provedenim istraživanjima definirano je da mjeseca srednja izdašnost crpilišta ne bi trebala prelaziti 600 l/s, dok bi dnevna kolebanja izdašnosti ovisila o tekućoj potrošnji, te radu uređaja za kondicioniranje i distribuciju vode. (Duić, 2007).

#### 3.2. Količine padalina

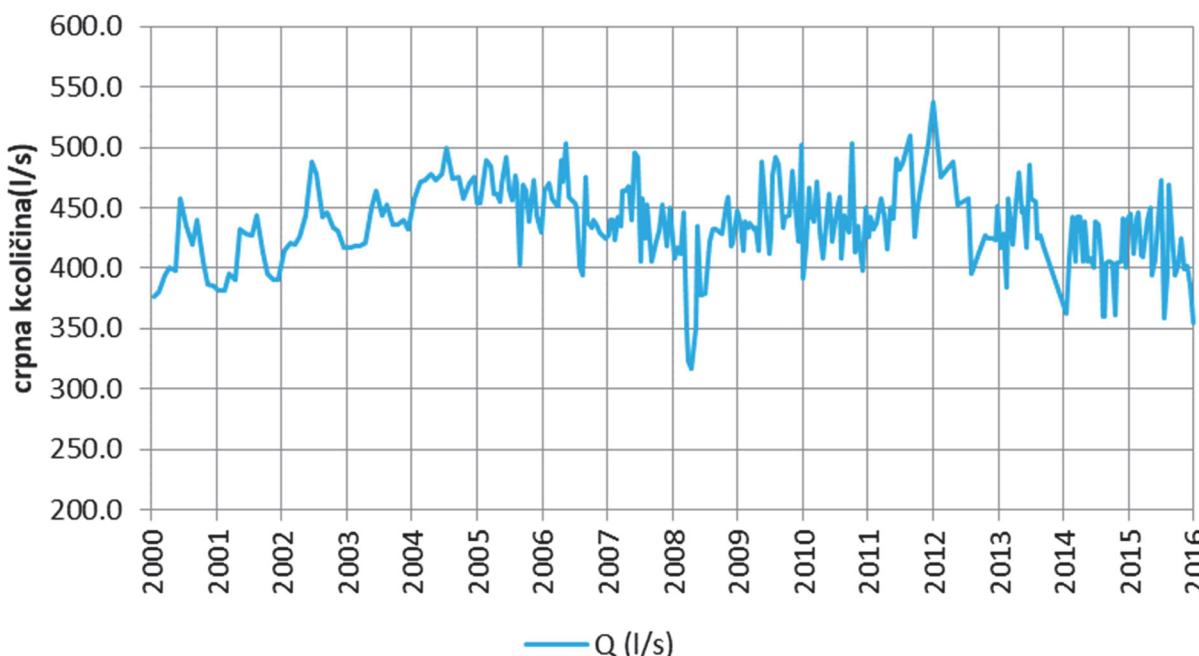
Prema dostupnim klimatološkim podacima umjerenou kontinentalne klimatske prilike su u širem području općenito dosta homogene (Zaninović et al. 2008). U padalinskom režimu ističu se dva maksimuma, jedan koncem ljeta i drugi u jesen. Ovaj prvi maksimum povezan je s utjecajem kontinentalnoga pluviometrijskoga režima, dok jesenski maksimum nastaje pod utjecajem maritimnoga pluviometrijskog režima koji u prosjeku donosi nešto manji iznos padalina, ali veći broj kišnih dana. Za mjesecne padaline općenito su karakteristična velika odstupanja od prosječnih vrijednosti.

#### 3.3. Opažanja razina podzemne vode na području crpilišta Vinogradi

U sklopu mreže opažanja podzemnih voda na crpilištu Vinogradi inicijalno je organizirano opažanje na svim zdencima (18 zdenaca) i najprikladnjim piezometarskim bušotinama načinjenim u sklopu tekućih i prethodnih istraživanja crpilišta, na 57 piezometarskih bušotina, na 22 lokacije. Naime, na većini lokacija postoji veći broj piezometara s različitim zacijevljenjem. Pri tome piezometri koji u svojoj oznaci imaju simbol „A“ bilježe razine u izvornom sloju. Tako primjerice na lokaciji Pz-7 postoji 5 piezometara od kojih Pz-7A zacijevljuje najplići, izvorni sloj koji nije zahvaćen eksplotacijskim zdencima, a koji se napaja infiltracijom padalina i preko kojega se odvija napajanje niže položenog zahvaćenog vodonosnika. Piezometarska cijev s oznakom Pz-7/1 zahvaća sve ili većinu slojeva u vodonosniku koji su zahvaćeni eksplotacijskim zdencima, a od tih slojeva pojedini su posebice zacijevljeni, tako da Pz-7/1 zahvaća prvi, Pz-7/2 zahvaća drugi, a Pz-7/3 zahvaća treći od slojeva u vodonosniku.

### 4. REZULTATI OBRADE PODATAKA I DISKUSIJA

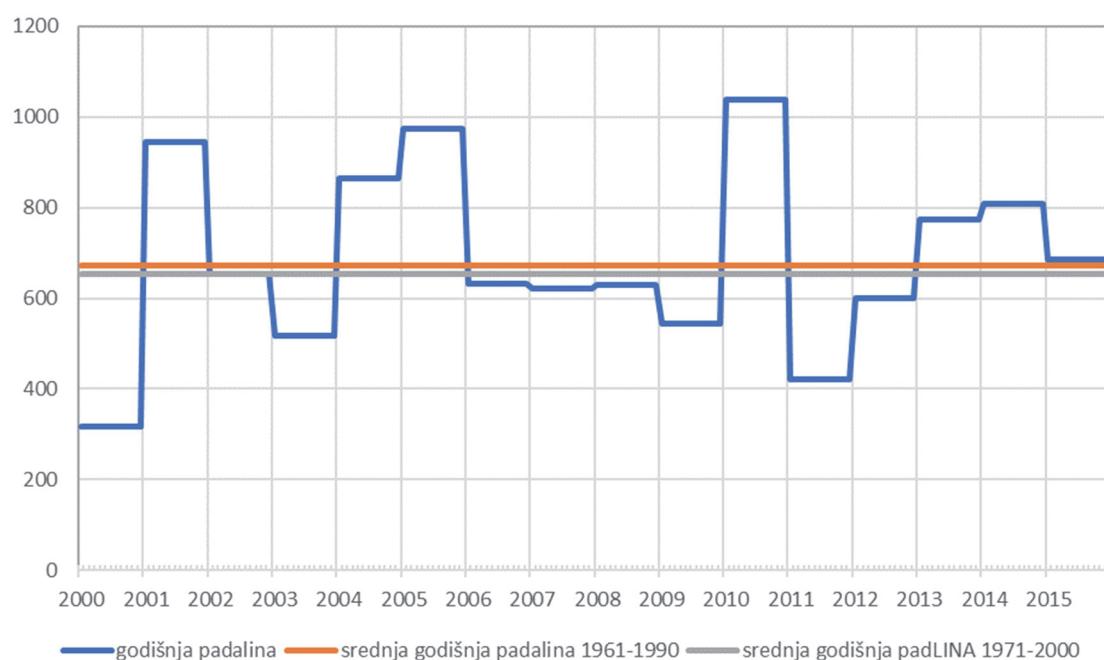
U posljednjih petnaestak godina, može se zapaziti da je prosječna crpna količina iznosi 435 l/s. (Slika 3).



Slika 3. Ukupna crpna količina na crpilištu Vinogradi za razdoblje 2000-2015. godine

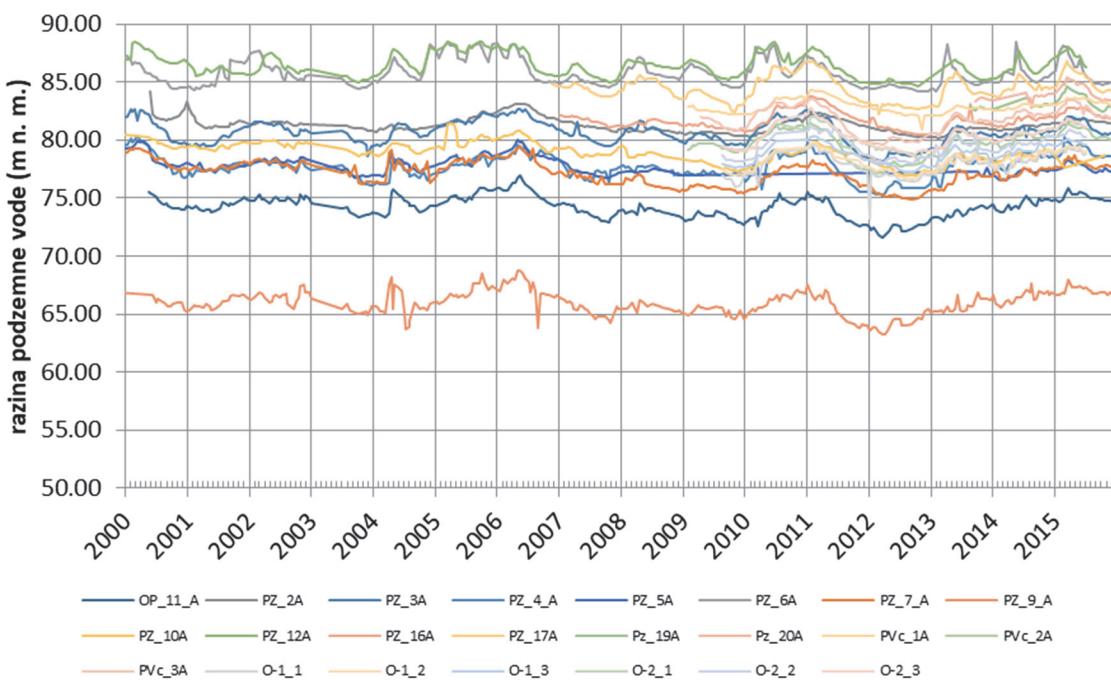
Kolebanja crpnih količina imala su općenito dobro izražen odraz na stanje razina podzemnih voda, međutim, intenzitet toga odraza ovisio je ne samo o udaljenosti, odnosno položaju pojedinih opažačkih objekata i pojavama napajanja podzemnih voda u ovom heterogenom vodonosnom sustavu, nego i o pojavama starenja zdenaca, odnosno kondiciji zdenačkih sita po cijelom profilu zacijsavljenja. Mogu se zapaziti povremena intenzivnija crpljenja, ali jednako tako i smanjenje crpnih količina uglavnom u zimskom razdoblju. Zapaža se izrazito smanjenje crpnih količina tijekom ožujka, travnja i svibnja 2008. godine.

Naročito su pri tome zanimljivi podaci o količinama padalina na području Osijeka izraženi u mm. Prosječna godišnja količina padalina na području Osijeka prema podacima DHMZ-a u razdoblju od 2000 do 2015 godine (**Slika 4**) iznosi 689 mm, što je vrlo blisko prosječnim vrijednostima za razdoblje 1961-1990 za koje iznosi 672 mm, odnosno za razdoblje 1971-2000 kada prosječna količina padalina iznosi 654 mm (Zaninović et al., 2008). Kod analize padalina zanimljivi su upravo podaci o odstupanju pojedinačnih godišnjih padalina od tih prosječnih vrijednosti. Zabilježeni su i ekstremi kako u smislu minimalne godišnje padaline u 2000. godini koja je iznosila 317 mm, tako i u vidu maksimalne zabilježene količine padaline mjerene u Osijeku za promatrano razdoblje koja je iznosile od 1038 mm u 2010. godini.



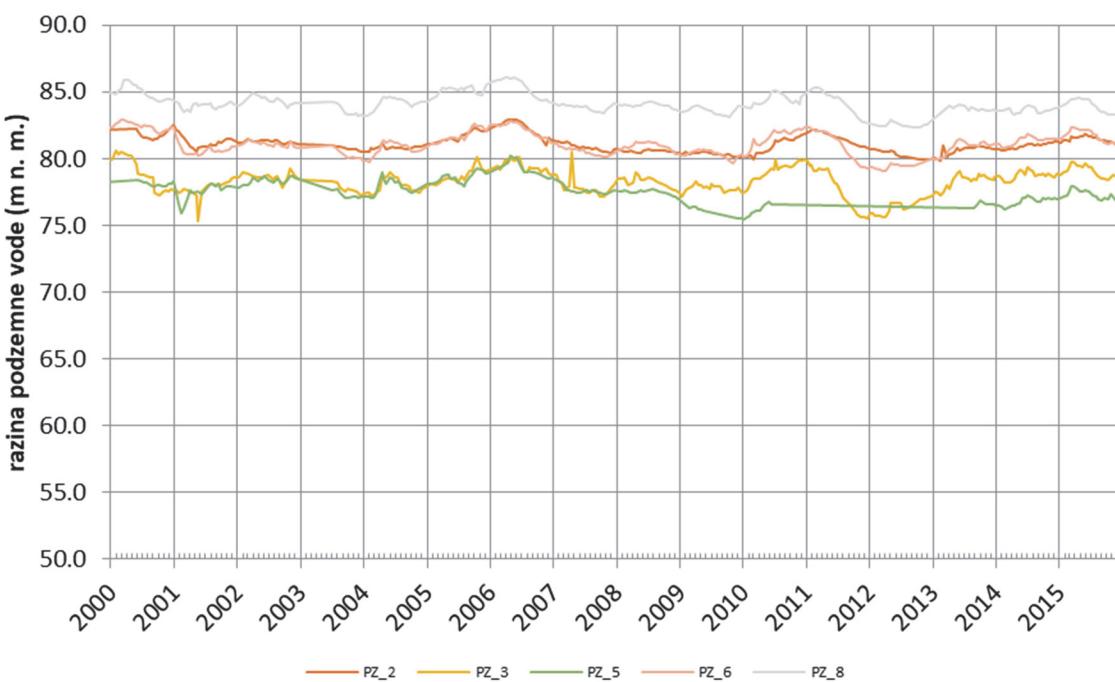
**Slika 4. Padaline na meteorološkoj postaji Osijek razdoblje 2000-2015. godine**

Ranijim analizama razina podzemnih voda u opažačkim objektima crpilišta Vinogradi, zapaženo je da osim očekivane ovisnosti razina o padalinama, crpnim količinama i udaljenosti od eksploracijskih zdenaca razina podzemnih voda ovisi i o pojavama starenja zdenaca, odnosno zatvaranja zdenačkih sita po cijelom profilu zacijsavljenja. U nastavku će biti prikazani nivogrami karakterističnih aktivnih piezometara odnosno piezometarskih gnjezda koji najbolje pokazuju razvitan sniženja u vodonosnoj sredini i nisu pod utjecajem sniženja razina uzrokovanih padom specifične izdašnosti zdenaca. Kod analize razina podzemne vode posebice treba naglasiti učinak mjerila na koje se promatrane razine odnose. Po vertikali razlikujemo piezometre koje zahvaćaju izvorni sloj i u nazivu imaju simbol „A“ (**Slika 5**) koji očekivano pokazuju najbrži odgovor na meteorološke prilike i piezometre koje prate razine u slojevima zahvaćenim sitima eksploracijskih zdenaca. (**Slike 6, 7, 8, 9**). Obzirom na udaljenost od linije zdenaca piezometri su podijeljeni u tri grupe; piezometre koji su udaljeni više od 1km od linije zdenaca (**Slika 6**), piezometre udaljene 100-500 m od linije zdenaca (**Slika 7**), te piezometre smještene neposredno uz eksploracijske zdence (**Slike 8, 9, 10**).



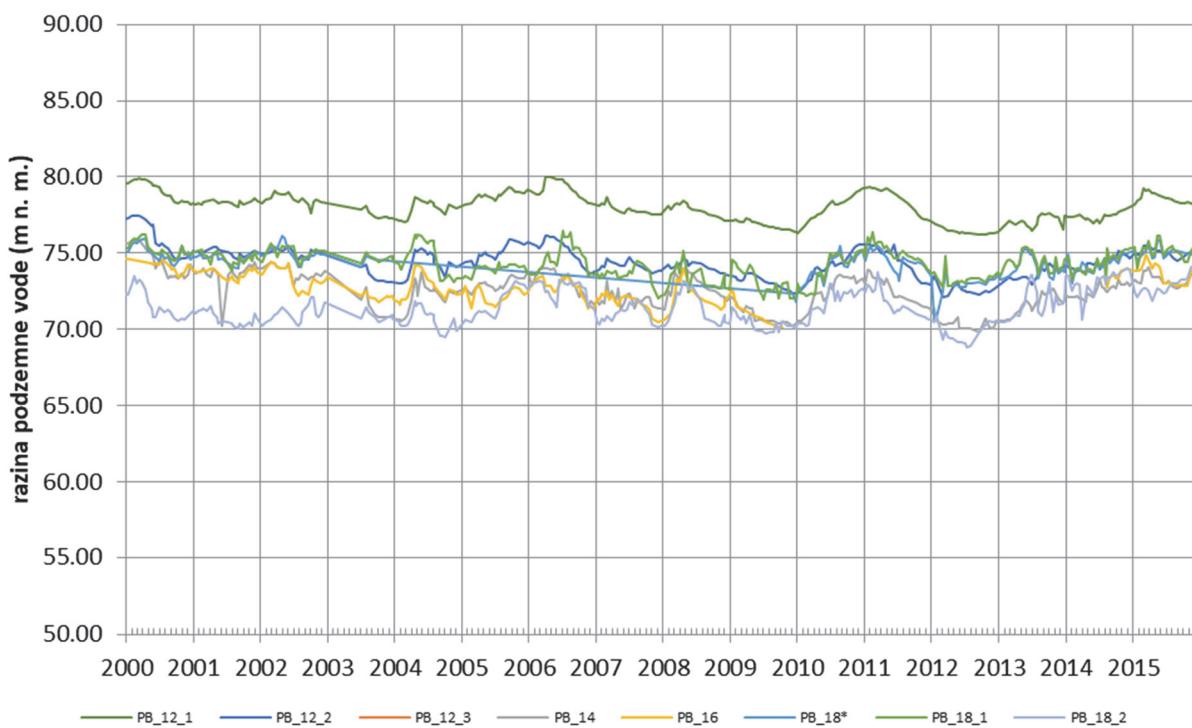
Slika 5. Razine podzemne vode u izvornom sloju crpilišta Vinogradi za razdoblje 2000-2015. godine

Najudaljeniji aktivni piezometar koji se opaža je piezometar PZ-8 udaljen oko 5 km od središta linije zdenaca. Na njemu i ostalim aktivnim piezometrima koji se nalaze na udaljenostima od oko 1-2 km (Slika 6), od zone zdenaca uočavaju se sezonska kolebanja razina podzemne vode kako u izvornom sloju tako i u slojevima zahvaćenim zdencima na crpilištu. Na svim piezometrima i u svim slojevima uočava se porast razina tijekom 2005 pa sve do polovice 2006. godine što je u skladu sa zabilježenim iznadprosječnim količinama padalina tijekom 2004. i 2005. godine, a kojima je prethodila sušna 2003. godina. Godina s najvećom količinom oborina 2010 odražava se na razinama udaljenih piezometara s nešto nižim apsolutnim vrijednostima nego onima tijekom 2005 godine što se može objasniti zasićenjem vodonosnog sustava oborinama tijekom uglavnom prosječnih godina 2006-2009., no izrazito sušna 2011 prepoznaje se smanjenjem razina. Može se zaključiti kako unatoč vrlo izraženim razlikama u količinama padalina za promatrano razdoblje razine u udaljenim piezometrima amplitude razina variraju maksimalno 3-5 metara što s obzirom na ukupnu debljinu zahvaćenih slojeva koja iznosi 60-80 metara nije problematično sa stanovišta vodoopskrbe.



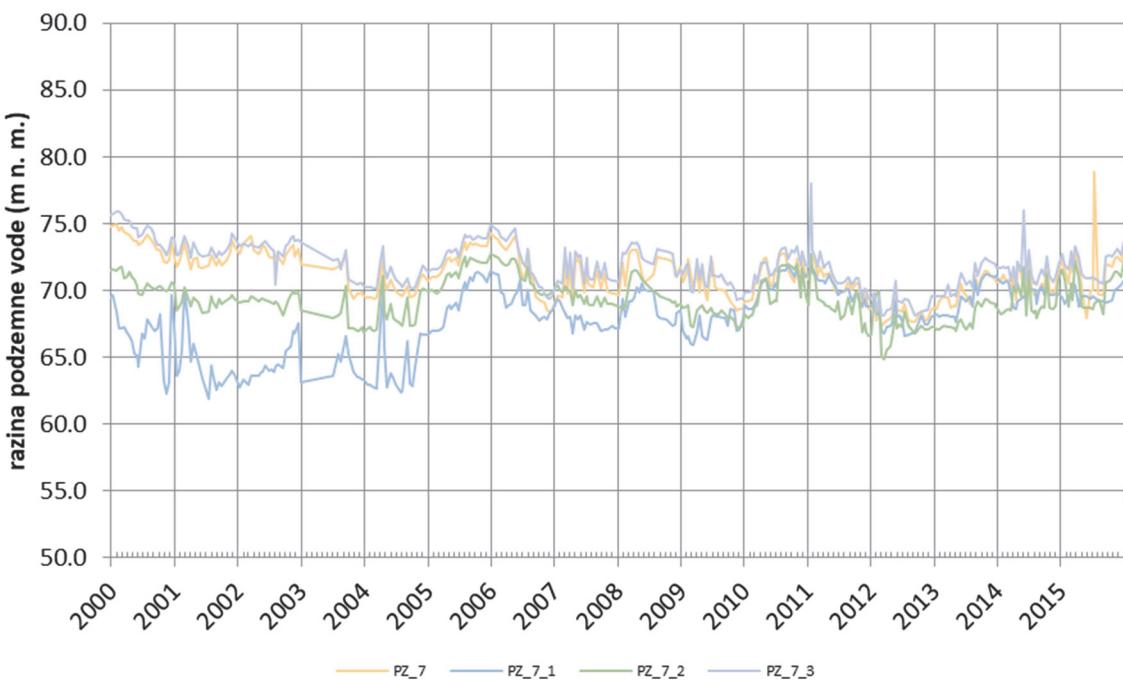
Slika 6. Kolebanje razine podzemne vode u udaljenim piezometrima.

Na slijedećoj slici (Slika 7) prikazano je kolebanje razine podzemne vode po profilu vodonosnoga sustava prema mjerjenjima na piezometarskim gnijezdima smještenim oko 100 do 500 m od eksploracijskih zdenaca, dakle u njihovom neposrednjem okružju. To su piezometarska gnijezda PB-12 i PB-18, te usamljeni piezometri PB-14 i PB-16. Piezometarsko gnijezdo PB-12 nalazi se oko 500 m jugoistočno od zdenca Z-7, dakle položeno je okomito na sredinu linije zdenaca, s tim da se piezometar PB-18\* opažao nakon dužeg prekida od kraja 2009. godine. Na svim piezometrima u neposrednom okružju crpilišta zapaža se vrlo sličan odraz koji je nastao kao kombinacija utjecaja crpilišta i infiltracije padalina kao mehanizma obnavljanja vodonosnika. Intenziteti tih odraza su različiti za pojedine piezometre ovisno o njihovoj dubini po profilu vodonosnika.



**Slika 7. Kolebanje razine podzemne vode u piezometrima udaljenim 100 do 500 m od eksploracijskih zdenaca.**

Razine podzemne vode po profilu vodonosnoga sustava uzduž zdenaca, prikazane su za piezometarsko gnijezdo PZ-7 (smješteno oko 20 m južno od zdenca Z-7) na Slici 8., za piezometarsko gnijezdo PZ-4 (smješteno između zdenaca B-14 i Z-15) na Slici 9., a za piezometarsko gnijezdo PZ-9 (smještenog pokraj zdenaca Z-11) na Slici 10. U piezometrima koji zahvaćaju različite slojeve vodonosnika po dubini zapažaju se kolebanja ovisno o eksploracijskim crpnim količinama, a također su razvidni utjecaji zatvaranja zdeničkih sita, što uzrokuje porast razine u pojedinim slojevima, odnosno snižavanje razine u slojevima u kojima se "pojačano crpi" (PZ-4-1, PZ-4-2, PZ-9-1 i PZ-9-2)



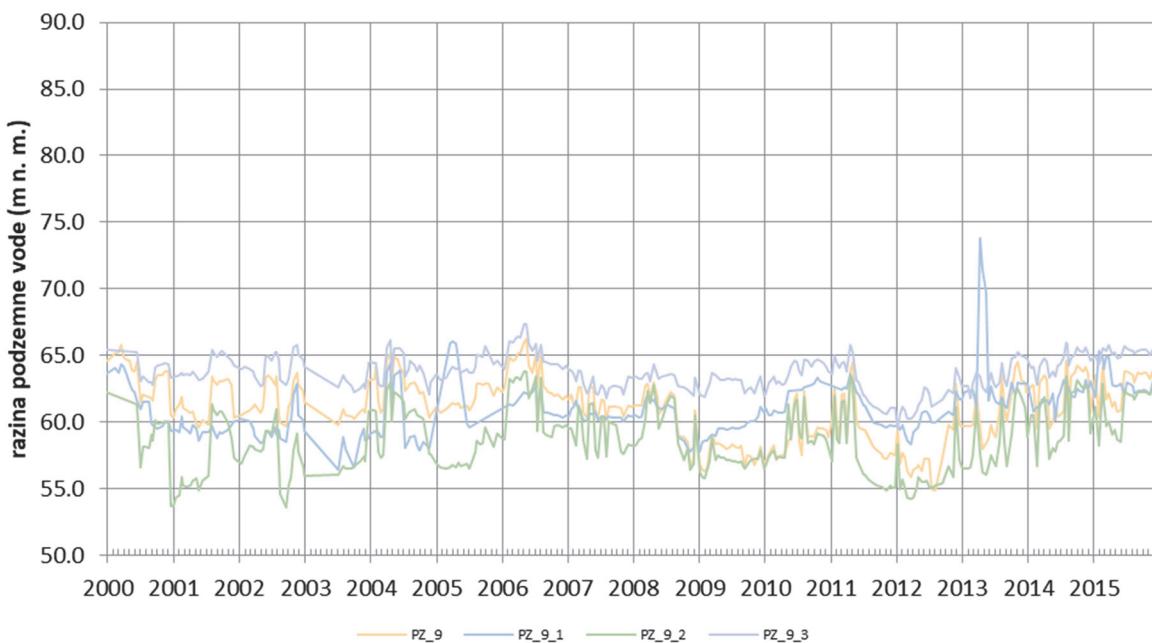
**Slika 8. Kolebanje razine podzemne vode po profilu vodonosnika na lokaciji piezometarskoga gnijezda PZ-7 smještenog pokraj zdenaca Z-7.**



**Slika 9. Kolebanje razine podzemne vode po profilu vodonosnika na lokaciji piezometarskoga gnijezda PZ-4 smještenog između zdenaca Z-14 i Z-15.**

Analizom nivograma za pokrovni sloj i zahvaćeni vodonosnik može se otkriti da porast razine u izvornom sloju kao rezultat napajanja uslijed padalina ima veću amplitudu od amplitude kolebanja razine vode u vodonosniku, te da maksimumi vodonosnika vremenski zaostaju 1-2 mjeseca za maksimumima u izvornom sloju.

Iz prikazane analize može se zaključiti da se potvrdio prepostavljeni proces odvijanja infiltracije padalina i s tim povezano napajanje podzemnih voda koji je prepostavljen u ranijim istraživanjima i studioznim analizama bilance podzemne vode na crpilištu Vinogradci (Duić 2007; Urumović et al. 2011).



**Slika 10. Kolebanje razine podzemne vode po profilu vodonosnika na lokaciji piezometarskoga gnijezda PZ-9 smještenog pokraj zdenaca Z-11.**

## 5. ZAKLJUČAK

Temeljem prikazanih podataka može se zaključiti kako razine podzemne vode dubokog kvarternog vodonosnika kakav je zahvaćen na crpilištu Vinogradi ne pokazuju drastično opadanje čak niti tijekom ekstremno sušnih godina tijekom kojih količina padaline padne na manje od 50% vrijednosti dugogodišnjeg prosjeka. To se može pripisati inertnosti vodonosnog sustava uslijed njegove litološke građe i izrazite nehomogenosti, a pokazalo se kako i takvi vodonosnici mogu sadržati dragocjene količine podzemne vode, poglavito imajući na umu kako većina klimatološkim modela predviđa u budućnosti još izraženije ekstreme. Tijekom ekstremno vlažnih godina nadomješta se deficit vlage u podzemljtu dok se suvišak vode drenira hidrografskom mrežom. U uvjetima značajno manjih količina padalina dolazi do reduciranja vanjskog pražnjenja podzemnih voda (evapotranspiracija i drenaža duž površinske hidrografiske mreže).

Obzirom na izrečeno osim dalnjeg pomnog praćenja vodonosnih sustava koji zahvaćaju duboke vodonosnike kakav je slučaj crpilišta Vinogradi naročito treba naglasiti potrebu njihove zaštite odnosno održavanja prirodne kakvoće vode u njima.

## 6. LITERATURA

- Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ), 2013: Šesto nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC), Zagreb
- Duić, Ž. (2007): Obnovljivost zaliha podzemnih voda heterogenog vodonosnog kompleksa na primjeru osječkog crpilišta Vinogradi. Doktorska disertacija
- European Environment Agency, 2017: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 An indicator-based report
- Urumović, K. (1982): Hidrogeološke značajke istočnog dijela dravske potoline. Doktorska disertacija
- Urumović, K., Duić, Ž., Hlevnjak, B. (2011): Impact of rainfall infiltration on groundwater recharge of the deep quaternary aquifer, Geologia Croatica. Vol. 64/1, pp 17-30
- Urumović, K., Hernitz, Z., Šimon, J. (1978): O kvarternim naslagama istočne Posavine (SR Hrvatska). Geol. vjesnik, 30/1, 297-304, Zagreb.
- Urumović, K., Hernitz, Z., Šimon, J., Velić, J. (1976): O propusnom mediju kvarternih, te gornjo i srednjo-pliocenskih naslaga sjeverne Hrvatske. IV jug.simp.o hidrogeol. i inž.geol., 2,395-410, Skopje.
- Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M. et al, 2008: Klimatski atlas Hrvatske / Climate atlas of Croatia 1961–1990., 1971–2000. Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 200 str.

# FOTOKATALITIČKA OKSIDACIJA TRAGOVA HERBICIDA U ZRAKU

## PHOTOCATALYTIC OXIDATION OF TRACE HERBICIDES IN AIR

Elizabeta Radetić<sup>1</sup>, Lucija Radetić<sup>1</sup>, Ivana Melnjak<sup>1</sup>, Ivana Grčić<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

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

**Sažetak:** Hlapivi organski spojevi (eng. Volatile Organic Compounds, dalje: VOC) i aerosoli postali su jedni od glavnih onečišćivila zraka, u zatvorenim i otvorenim prostorima. Izvor VOC-eva u zraku je i česta upotreba herbicida i pesticida općenito zbog visoke hlapivosti takvih organskih molekula, dok se dio pesticida veže na krute čestice i prenosi se zrakom u obliku aerosola. Široka upotreba pesticida na poljoprivrednim površinama doprinosi povećanoj koncentraciji VOC-eva u zraku obzirom da su poljoprivredne površine prepoznate kao kolektivni izvori emisija. Trenutno ne postoji zakonodavna osnova za praćenje emisija s poljoprivrednih površina. Sukladno Objedinjenim uvjetima zaštite okoliša, odnosno IPPC direktivi, fotokatalitička oksidacija uz TiO<sub>2</sub> navodi se kao alternativna najbolja raspoloživa tehnika (NRT), učinkovita za uklanjanje VOC-eva iz zraka. To je proces koja koristi sinergijsku interakciju svjetlosnog zračenja, katalizatora - poluvodiča i oksidacijskih spojeva kako bi razgradila onečišćivila u fluidima (vodi i zraku) do H<sub>2</sub>O i CO<sub>2</sub> te ostalih inertnih produkata ovisno o kemijskom sastavu onečišćivila.

Kako bi se potvrdila mogućnost primjene fotokatalitičke oksidacije za uklanjanje tragova herbicida iz zraka, proveden je niz eksperimenata u anularnom fotoreaktoru pod utjecajem simuliranog sunčevog zračenja. Rezultati su pokazali da je primjenom navedene tehnologije solarne fotokatalize pri optimalnim uvjetima relativne vlažnosti zraka moguće ukloniti/razgraditi promatrano onečišćivilo i smanjiti udio VOC-eva u struji zraka.

**Ključne riječi:** onečišćenje zraka, VOC- evi, herbicidi, fotokatalitička oksidacija, solarna fotokataliza

**Abstract:** Volatile Organic Compounds (VOC) and aerosols are common air pollutants, referring to both indoor and outdoor air pollution. Herbicides and pesticides in general, are a source of VOCs in air due to the volatility of organic molecules. Pesticides residues on particulate matter suspended in air are often found in aerosol compositions. Wide use of pesticides in agriculture contribute to the higher levels of VOCs as agricultural sources are identified as an area source since collective emissions from agriculture can be significant. Currently, no legislation in air protection deals with monitoring of emissions from such sources.

On the other hand, TiO<sub>2</sub> photocatalysis is recognized as one of the emerging best available technics (BAT) for VOC degradation according to the Integrated Pollution, Prevention and Control (IPPC) directive (96/61/EC). In photocatalytic process, organic pollutants are degraded to CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and other inert by-products due to synergy between irradiation, semiconductor catalyst and oxidizing species.

In this work, experiments were done to confirm the potential application of photocatalysis for purification of air polluted with trace-level of herbicide. The process was performed in anular photoreactor using artifical solar irradiation. The results showed the decrease of VOC concentration in outlet air flow thus indicate the efficient herbicide degradation at optimal relative humidity in the studied system.

**Keywords:** air pollution, VOCs, herbicides, photocatalytic oxidation, solar photocatalysis

Received: 25.11.2018. / Accepted: 06.12.2018.

Published online: 17.12.2018.

Znanstveni rad / Scientific paper

## 1. UVOD

Onečišćenje zraka je prisustvo kemijskih spojeva, onečišćivila, u atmosferi u dovoljno visokim koncentracijama da predstavljaju opasnost za organizme, ekosustave, klimu ili materijale koje je stvorio čovjek (VanLoon & Duffy 2000). Onečišćivila zraka međusobno se razlikuju po kemijskom sastavu, reakciji s okolinom, emisijama, postojanosti u okolišu, sposobnosti da se prenose na duge ili kratke udaljenosti i njihovu eventualnom utjecaju na zdravlje ljudi i / ili životinja. Međutim, oni dijele neke sličnosti i mogu se grupirati na četiri kategorije: (1) plinovita onečišćivila (npr. SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, troposferski ozon, VOC), (2) postojani organski spojevi (npr. dioksini), (3) teški metali (npr. Hg, Pb, Cd) i (4) krute čestice. Iako brojne prirodne aktivnosti (vulkani, požari, itd.) mogu osloboditi različita onečišćivila u okoliš, antropogene aktivnosti glavni su uzrok onečišćenja zraka. Antropogeni izvori onečišćenja zraka sve su brojniji, a najveći su i dalje izgaranje fosilnih goriva, promet, energetska postrojenja te industrijski procesi (Kampa & Castanas 2008; Vallero 2008). Onečišćenje zraka je globalni problem čije se negativne posljedice odražavaju na ljudskom zdravlju, ali i

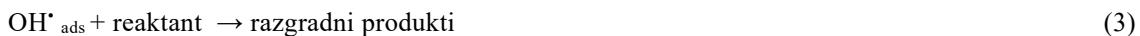
ekosustavima. Posljedice u okolišu su acidifikacija, eutrofikacija, smanjeni prinos usjeva dok se utjecaj na zdravlje očituje u raznim bolestima; od blažih alergija do ozbiljnih bolesti poput karcinoma (European Environment Agency 2017).

U skupinu glavnih onečišćiva zraka ubrajaju se i hlapivi organski spojevi (VOC) koji u atmosferi egzistiraju u obliku plina. VOC-evi su svi organski spojevi iz antropogenih i biogenih izvora, osim metana, koji uz dovoljnu količinu Sunčeve svjetlosti u reakcijama s dušikovim oksidima, mogu stvarati fotokemijske oksidanse, uključujući i troposferski ozon i čija se vrelista kreće u rasponu od 50 do 260 °C (Wang et al. 2007). Zbog izraženog svojstva hlapivosti postali su jedan od glavnih onečišćiva zraka, u zatvorenim prostorima i atmosferi. Izvori VOC-eva su različiti proizvodi kao što su na primjer: boje i lakovi, sredstva za čišćenja, pesticidi, materijali za graditeljstvo, foto-kopirni uređaji, printeri, trajni markeri, te razna ljepila (VanLoon & Duffy 2000).

Mnogi organski pesticidi su hlapive prirode te su stoga izvori onečišćenja zraka. U posljednjih 50 godina, količina i kvaliteta hrane drastično se povećala među ostalim i zbog primjene pesticida. Međutim, sve češćom upotrebljom, porasle su i negativne posljedice na sav živi svijet. Pesticidi su postali uzrok trovanja riba, smanjene reproduktivnosti ptica, ljudskih bolesti i sl. (Arias-Estevez et al. 2008; Kim et al. 2017). Biosfera, voda, tlo i zrak sastavnice su okoliša koje su najizloženije negativnom utjecaju pesticida. Procijenjeno je da više od 95 % primjenjenih pesticida ima utjecaj na ne ciljane skupine organizama. Učestalo korištenje pesticida stoga dovodi do gubitka bioraznolikosti i povećanja otpornosti štetnika. Mnogi pesticidi također pripadaju skupini postojanih organskih spojeva (POP) poznatih po dugom periodu zadržavanja u okolišu. Zbog svoje postojanosti takvi pesticidi egzistiraju godinama u okolišu, postaju dio hranidbenog lanca i bioakumuliraju se (Kampa & Castanas, 2008). Do onečišćenja zraka pesticidima dolazi prilikom njihova raspršivanja te naknadnim isparavanjem. U zatvorenim prostorima ventilacijski sustavi, sustavi grijanja i hlađenja također doprinose otpuštanju pesticida u zrak i dalnjem pronosu kroz prostor.

Fotokatalitička oksidacija je alternativna tehnologija pročišćavanja fluida (zraka i vode) čijom primjenom je moguće sprječiti/smanjiti emisiju pesticida u okoliš odnosno zrak (Brinkmann et al. 2016). Osnovna prednost ove metode su potrebni uvjeti koje je lako postići, a to su prisutnost UV i/ili vidljivog elektromagnetskog zračenja, prisustvo kisika i vode, odnosno vlage. Ostale prednosti uporabe ove tehnologije uključuju: mineralizacija onečišćiva umjesto prijenosa u drugi medij, ne zahtijeva uporabu opasnih tvari poput hipoklorita, peroksida ili ozona, odsutnost buke, niska potrošnja energije, rad pri niskim temperaturama i koncentracijama onečišćiva, vremenski gotovo neograničena upotreba fotokatalitički aktivnog materijala (Folli et al. 2015; McCullagh et al. 2011). Fotokatalitički je moguće ukloniti sljedeća onečišćiva iz zraka: VOC, neugodne mirise, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, amine i merkaptane, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO i O<sub>3</sub>. Primjenjuje se za pročišćavanje vode i zraka u sektoru industrije odnosno u postrojenjima za obradu otpada, fermentacijskim procesima, prilikom nanošenja premaza te prehrambenoj industriji. Za razliku od industrijskih procesa, primjena ove tehnologije za pročišćavanje zraka u zatvorenim prostorima ima puno veći potencijal za komercijalizaciju, osobito za uklanjanje VOC-eva (Wang et al. 2007; Boyjoo et al. 2016; Boonen & Beeldens 2013).

Fotokatalitička oksidacija temelji se na upotrebi poluvodičkog materijala kao katalizatora koji se aktivira pod utjecajem energije zračenja (*hv*). Prema *Teoriji vrpcí* (engl. *The band theory*), kada se površina poluvodičkog katalizatora (Slika 3) osvijetli fotonima (*hv*) koji imaju energiju jednaku ili veću od energije njihove zabranjene zone E<sub>g</sub> (*hv* ≥ E<sub>g</sub>) dolazi do pobuđivanja elektrona (e<sup>-</sup>) iz valentne u vodljivu vrpcu, uslijed čega u valentnoj vrpcí zaostaje prazno mjesto tzv. šupljina, koja prividno ima pozitivan naboj (h<sup>+</sup>). Upravo to razdvajanje električnog naboja, nastanak e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup> parova u poluvodičkom materijalu-fotokatalizatoru osnovni su preduvjet heterogenih fotokatalitičkih reakcija. Nastali parovi (e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup>) zbog svojeg nabaja pokreću redoks reakcije na površini katalizatora s adsorbiranim molekulama vode i O<sub>2</sub> prilikom čega se stvaraju jaki oksidansi: hidroksilni radikalni (•OH<sup>-</sup>) i superoksidni ioni (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>). Jednadžbe (1-7) sažeto prikazuju reakcije koje se odvijaju na fotokatalizatoru (Schneider et al. 2016).



Mehanizam heterogene fotokatalize podrazumijeva kompleksan slijed reakcija, koji se opisuje kroz nekoliko osnovnih koraka tipično za heterogene katalitičke sustave: (1) prijenos reaktanata (onečišćiva) iz mase fluida kroz granični sloj na površinu katalizatora, (2) adsorpcija onečišćiva na površinu katalizatora,

(3) reakcija oksidacije na aktivnom mjestu, (4) desorpcija nastalog produkta s površine fotokatalizatora i (5) otpuštanje nastalog produkta u masu fluida (Schneider et al. 2016). Onečišćena struja zraka ulazi u fotoreaktor gdje se onečišćivala adsorbiraju na površini fotokatalizatora te se postupno oksidiraju, a nastali produkti ( $H_2O$ ,  $CO_2$ , međuprodukti) se desorbiraju i otpuštaju u zrak koji izlazi iz fotoreaktora (Boyjoo et al. 2016).

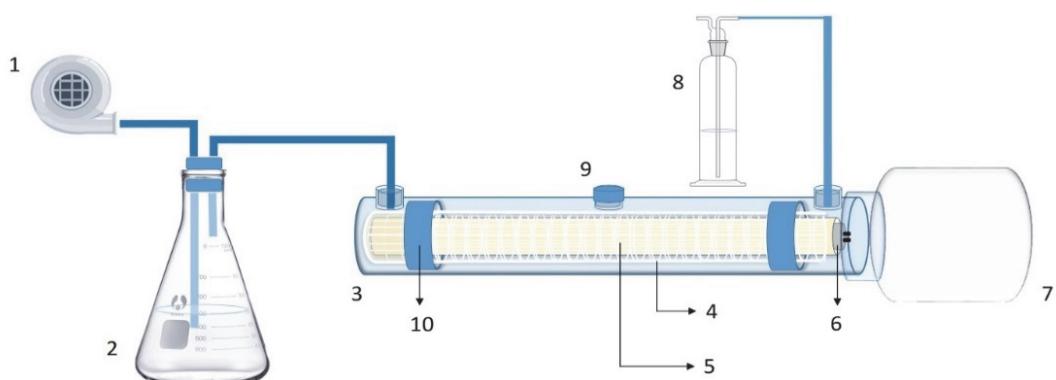
U ovom radu pažnja je posvećena fotokatalitičkoj razgradnji vrlo hlapivog herbicida, setoksidima u anularnom fotoreaktoru. Za iniciranje fotokatalitičkog reakcijskog ciklusa korišten je izvor umjetnog Sunčevog zračenja s niskim razinama UVA i UVB zračenja. Na taj način istražena je mogućnost oksidacije herbicida u uvjetima slabijih intenziteta zračenja, što predstavlja korak prema projektiranju procesa solarne fotokatalize na otvorenim prostorima u područjima iznad  $45^\circ$  SZŠ. Relativna vlažnost utvrđena je kao bitan parametar procesa, te su utvrđeni i ostali optimalni uvjeti za razgradnju herbicida.

## 2. EKSPERIMENTALNI DIO

### 2.1. Eksperimentalni reakcijski sustav

Eksperimentalni reakcijski sustav osmišljen je za jednoznačno ispitivanje razgradnje herbicida u struji zraka uslijed fotokatalitičke oksidacije. Sustav čine pumpa za zrak, komora za isparavanje, anularni fotoreaktor, ispiralica te komora za mjerjenje u kojoj se nalazi uređaj za ispitivanje kvalitete zraka. Eksperimentalni sustav je prikazan na **Slikama 1 i 2**. Princip rada je slijedeći: uključivanjem pumpe za zrak, protok zraka se povećava i putem cjevčica usmjerava na u komoru za isparavanje. Struja zraka zatim odnosi vodenu paru i ostale hlapive spojeve iz komore u anularni reaktor u kojem se odvijaju procesi fotokatalitičke razgradnje. Jedan dio zraka odlazi u ispiralicu gdje se otapaju plinovi i pare topive u vodi, a „pročišćeni zrak“ izlazi u okolinu. Ostatak zraka ulazi u komoru za mjerjenje gdje uređaj detektira razine formaldehida ( $HCHO$ ) i ukupnih hlapivih organskih spojeva (TVOC) te relativnu vlagu i temperaturu. Anularni reaktor ima dodatni sigurnosni otvor, na koji se prema potrebi mogu spojiti drugi instrumenti za izravno mjerjenje kvalitete zraka.

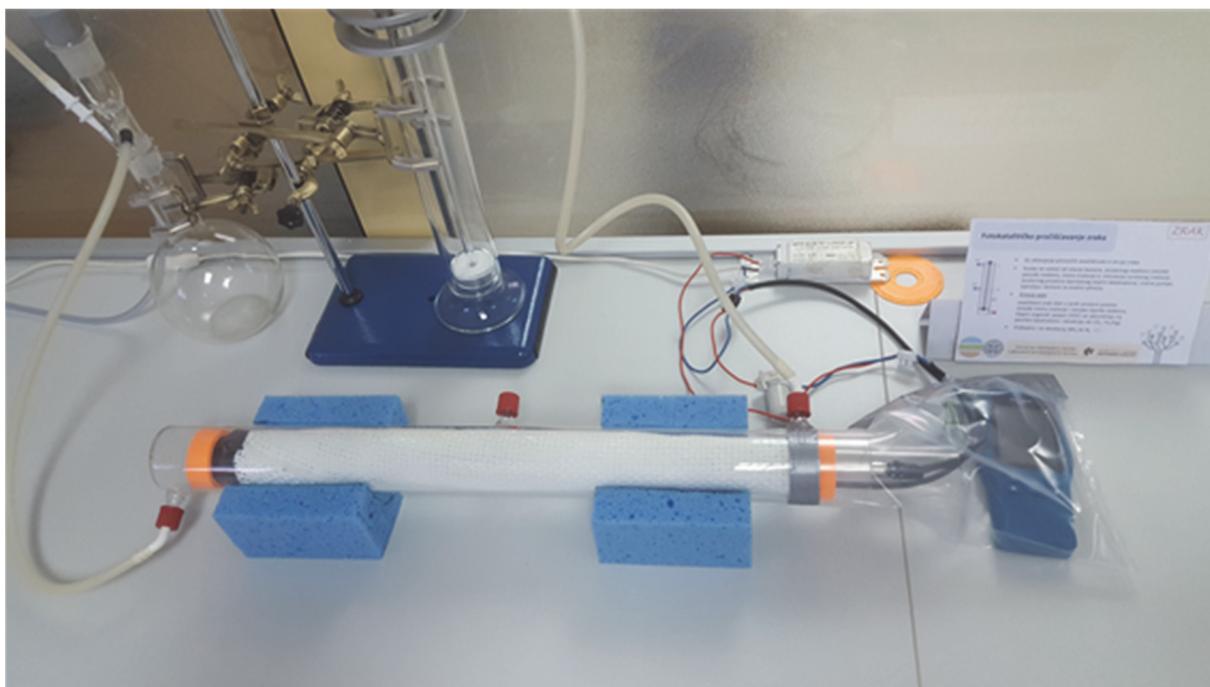
Pumpa za zrak (Fluval Q2) tijekom provedbe eksperimenata namještena je na protok zraka od  $240 \text{ L min}^{-1}$ , odnosno brzinu strujanja zraka od  $3,4 \text{ m s}^{-1}$ . Onečišćivalo se nalazi u komori za isparavanje (Erlenmayerovoj tikvici) u vodenoj otopini odnosno emulziji. Fotokatalitički anularni reaktor cilindričnog je oblika te izrađen od stakla (duljina 600 mm, polujmer 30 mm). Unutar reaktora nalazi se linearna fluorescentna žarulja s punim spektrom (Narva BIO vital® LT T5 24W / 958, duljine 549 mm; spektralne karakteristike korištenog izvora zračenja odgovaraju spektru Sunčevog zračenja), koja je ujedno i izvor zračenja, obložena mrežom od staklenih vlakana koji ima ulogu nosača fotokatalizatora. Staklena mreža premazana je tankim slojem  $TiO_2$  fotokatalizatora.



#### TUMAČ:

- |   |   |
|---|---|
| 1 - pumpa za zrak   | 6 - fluorescentna žarulja s punim spektrom (tip T5, 23 W) |
| 2 - komora za isparavanje                                       | 7 - komora za mjerjenje ( $V = 1 \text{ L}$ pri s.u.)     |
| 3 - cjevni reaktor ( $L = 60 \text{ cm}$ , $r = 3 \text{ cm}$ ) | 8 - Rettberg ispiralica s vodom                           |
| 4 - mreža od staklenih vlakana s katalizatorom                  | 9 - sigurnosni ventil                                     |
| 5 - kvarcna cijev ( $r = 1,6 \text{ cm}$ )                      | 10 - porozni nosači cijevi za centriranje                 |

*Slika 1. Shematski prikaz eksperimentalnog reakcijskog sustava*

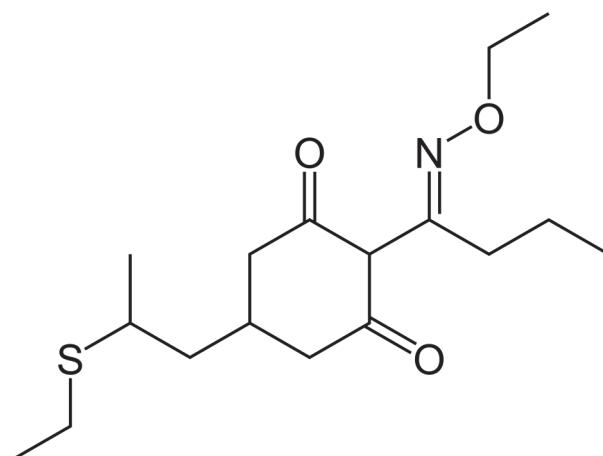


*Slika 2. Stvarni prikaz eksperimentalnog reakcijskog sustava*

Mreža s fotokatalitičkim slojem pripremljena je prema objavljenoj proceduri (Grčić et al. 2017). Mreža od staklenih vlakana (roving tkanina, RT200,  $200 \text{ g m}^{-2}$ , Keltek) premazana je suspenzijom fotokatalizatora pripremljenom na sljedeći način: deionizirana voda, etanol, prah TiO<sub>2</sub> (AEROXIDE ® P25, Evonik) i octena kiselina miješani su 15 minuta, zatim je provedeno homogeniziranje dobivene otopine u ultrazvučnoj kupelji (80 W, 35 kHz) u trajanju od 2 minute. Dodan je tetraetoksilsilan (TEOS) te se otopina nastavila miješati jedan sat uz grijanje na 50 °C. Imobilizacija je izvedena uranjanjem mreže u dobivenu otopinu fotokatalizatora i sušenjem na 70 °C. Postupak sušenja trajao je 15 minuta i ponovljen je 4 puta.

## 2.2. Modelno onečišćivalo

Setoksidim (**Slika 3**), poznat kao NP-55, je selektivni herbicid koji se koristi za kontrolu rasta jednogodišnjih i višegodišnjih travnatih korova. Puni naziv prema IUPAC-ovoj nomenklaturi je 2-[1-(etoksiamino)butiliden]-5-(2-ethylsulfanilpropil)cikloheksan-1,3-dion, a kemijska formula C<sub>17</sub>H<sub>29</sub>NO<sub>3</sub>S. To je masna, bezmirisna, nekorozivna tekućina jantarne boje, vrelište je više od 90 °C pri tlaku od  $3 \times 10^{-5}$  mm Hg. Topljivost u vodi je slaba (4 700 mg/L pri 20 °C i pH 7). Razina toksičnosti je niska: LD<sub>50</sub> oralno kreće se u rasponu od 2600 do 3100 mg/kg tjelесне mase dok je LD<sub>50</sub> putem kože (transdermalno) veći od 5000 mg/kg (Kamrin 1997). Setoksidim, pri tlaku pare od  $1.6 \times 10^{-7}$  mm Hg na 20-25 °C, u atmosferi egzistira u obliku pare i čestica aerosola. Setoksidim dospio u zrak se razgrađuje u atmosferi reakcijom s fotokemijski proizvedenim hidroksilnim radikalima.



*Slika 3. Struktorna formula setoksidima*

U eksperimentima su korištene dvije koncentracije herbicida čime su postignute različite vrijednosti ukupnih hlapivih organskih spojeva (TVOC) u trenutku adsorpcijske ravnoteže tj. na početku provedbe solarne fotokatalize. U tu svrhu 1 mL i 2,5 mL herbicida je pomiješano s 400 i 300 mL vode. Na taj način dobivena je koncentracija C1 od 1:400 i C2 od 2,5:300 (mL/mL) emulzije herbicida u vodi. Navedena dvokomponentna smjesa/emulzija nalazi se u komori za isparavanje. Kako je gustoća vode veća od gustoće herbicida, tanki sloj herbicida formirao se iznad vodenog sloja. Da bi se postigla dobra izmiješanost emulzije, smjesa u komori za isparavanje kontinuirano je miješana pomoću magnetske miješalice. Zadane koncentracije C1 i C2 osiguravaju dostatnu količinu herbicida u reaktorskom sustavu (mjerena kao ukupni sadržaj hlapivih tvari – TVOC), te potrebnu zasićenost vodenom parom odnosno vlagom tijekom trajanja eksperimenata.

### 2.3. Analitičke tehnike

Qoarker analizator kvalitete zraka je prijenosni multifunkcionalni uređaj čija je svrha određivanje kvalitete zraka (AQI), detektiranje razine formaldehida (HCHO) i ukupnih hlapivih organskih spojeva (TVOC) te relativne vlage i temperature zraka. Prikladan je za korištenje u zatvorenim i otvorenim prostorima. Na poleđini se nalazi otvor za usis zraka. Kada se uređaj upali, zrak kroz njega dospijeva do elektrokemijskih poluvodičkih senzora pomoću kojih se očitavaju razine HCHO, TVOC, vлага i temperatura. HCHO i TVOC izražavaju se u mg/m<sup>3</sup>, temperatura u °C, a relativna vлага u %. Uređaj ima ključnu ulogu u eksperimentu jer se na osnovi izmjerjenih razina HCHO, TVOC, relativne vlage i temperature, zabilježenih u realnom vremenu, provode analize te izvode zaključci o uspješnosti fotokatalitičke oksidacije herbicida.

Uređaj Geotech GA5000 dizajniran je za mjerjenje odlagališnih plinova: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> u %, CO, H<sub>2</sub>S u ppm. Uloga uređaja GA5000 u ovom eksperimentu bila je mjerjenje koncentracije O<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> kako bi se ustanovilo kojom brzinom napreduje mineralizacija onečišćiva i je li uopće započela.

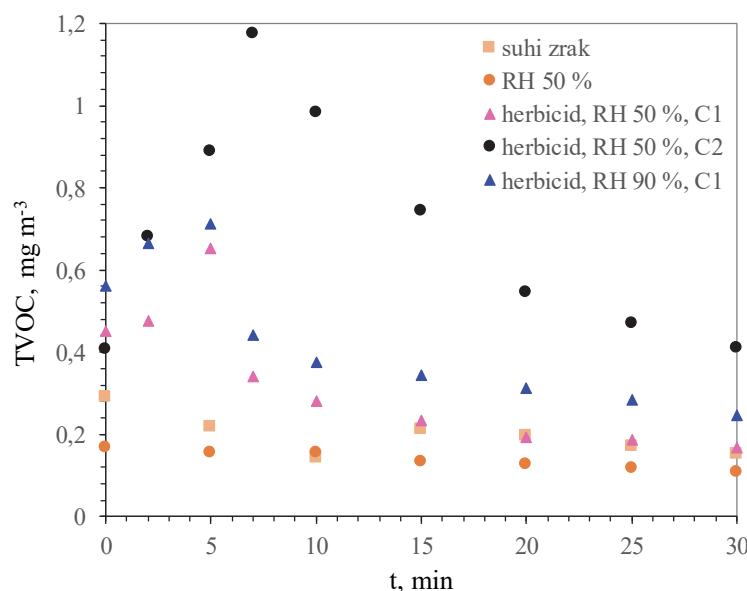
Kako bi se utvrdio sadržaj hlapivih organskih tvari te ostalih organskih tvari kondenziranih nakon provedbe eksperimenta (ostatak herbicida, razgradnih produkata), mjerjen je sadržaj ukupnog organskog ugljika (TOC) u uzorcima vode iz ispiralice. Odabrana je tehnika mjerjenja ukupnog organskog ugljika na uređaju TOC/TN analizator SHIMADZU / TOC-Vcpn + TN-1 + OCT-1.

## 3. REZULTATI I RASPRAVA

### 3.1. Preliminarni rezultati

Kako bi se utvrdio optimalni način provedbe fotokatalitičke razgradnje herbicida u eksperimentalnom sustavu, provedeni su eksperimenti prema opisanom planu provedbe eksperimenata. Preliminarni eksperimenti provedeni su uz korištenje smjese herbicid-voda 1 : 400 (mL/mL).

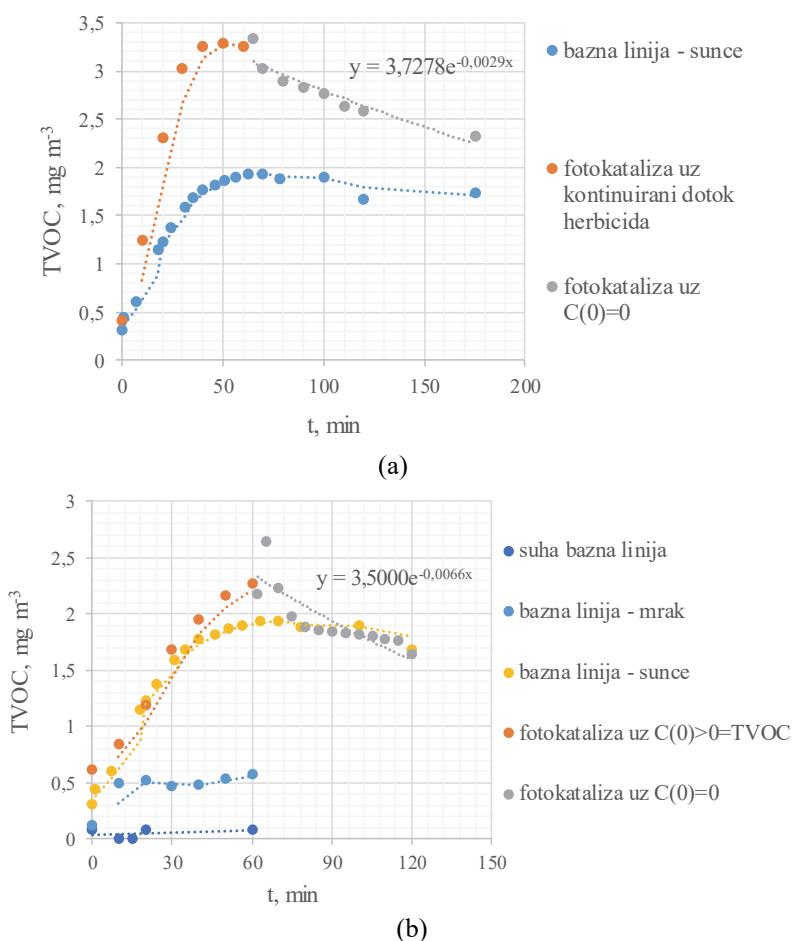
Na **Slici 4** prikazani su preliminarni rezultati mjerjenja TVOC vrijednosti u izlaznoj komori tijekom 30 minuta strujanja suhog zraka, vlažnog zraka (RH > 50 %) i vlažnog zraka s pesticidom u mraku.



**Slika 4.** Rezultati kontinuiranog mjerjenja TVOC-a tijekom strujanja suhog zraka, vlažnog zraka (preko vode u komori za isparavanje) i vlažnog zraka s herbicidom u mraku. Eksperimenti su provedeni pri različitim koncentracijama herbicida u komori za isparavanje (C1 i C2).

Iz prikazanih rezultata vidljivo je kako se herbicid adsorbira na površini mrežice s fotokatalitičkim filmom, te već nakon 30 minuta postižemo adsorpcijsku ravnotežu u sustavu. Rezultati mjerenja prilikom strujanja suhog i vlažnog zraka predstavljaju baznu liniju TVOC-a u sustavu. Različita količina RH (%) postignuta je uranjanjem cjevčice ispod razine sloja pesticida u komori za isparavanje. U uvjetima dobrog miješanja, položaj cjevčice nije utjecao na količinu isparenog pesticida, već samo na udio vlage u sustavu. Na temelju rezultata eksperimenata provedenih s različitom količinom vlage u sustavu vidi se nešto sporija adsorpcija herbicida na mrežicu s fotokatalitičkim filmom pri većem udjelu vlage uslijed istovremene kompetitivne adsorpcije molekula  $H_2O$  na hidrofilni film. Dobiveni rezultati ukazuju na dovoljnu zasićenost sustava vlagom, te na postojanje neophodnog elektron donora na površini fotokatalitičkog filma. Naime, molekule vode odnosno hidroksilna skupina ( $-OH$ ) tijekom procesa fotokatalize reagira sa šupljinom nastalom u strukturi fotokatalizatora ( $TiO_2$ ) pri čemu nastaju visoko reaktivni hidroksilni radikali ( $\cdot OH$ ). Hidroksilni radikali neophodni su za provedbu procesa razgradnje organskih onečišćivila.

Kako bi se utvrdio optimalan sastav vlage u zraku provedeni su eksperimenti pri 50 i 90 % RH mjerenoj u komori za mjerjenje na izlazu iz anularnog reaktora. Rezultati su prikazani na **Slikama 5 a) i b)**. Paralelno sa svakim eksperimentom snimana je bazna linija: suha bazna linija odnosi se na mjerjenja TVOC-a prilikom strujanja suhog zraka preko mrežice, bazna linija u mraku odnosi se na strujanje vlažnog zraka, dok se bazna linija na suncu odnosi na strujanje vlažnog zraka preko mrežice osvijetljene sunčevim zračenjem. Zadnja bazna linija je neophodna kako bi se odredila stvarna učinkovitost fotokatalitičke razgradnje herbicida s obzirom da uslijed grijanja mrežice dolazi do otpuštanja komponenata fotokatalitičkog filma (organski silani i octena kiselina) koji izravno utječe na porast očitanih vrijednosti TVOC-a. Takva bazna linija služi za korekciju vrijednosti TVOC-a kako bi se dobole stvarne vrijednosti koje odgovaraju koncentraciji herbicida u sustavu tijekom provedbe eksperimenta. Svi eksperimenti su provedeni u dvije faze. Prva faza fotokatalize provedena je uz kontinuirani dotok herbicida. U tom slučaju početna vrijednost koncentracije herbicida u sustavu odgovara ravnotežnoj koncentraciji herbicida nakon adsorpcije istog na fotokatalitički film u mraku, odnosno izmjerenoj vrijednosti TVOC-a prije uključivanja izvora zračenja ( $C(0) = TVOC_{ravn}$ ). U drugoj fazi fotokatalize, smjesa u komori za isparavanje zamijenjena je destiliranim vodom, te je početna vrijednost koncentracije herbicida u sustavu jednaka nuli ( $C(0) = 0$ ) odnosno fotokatalitički se razgrađuje samo herbicid prethodno prisutan u sustavu.



**Slika 5.** Rezultati mjerjenja TVOC-a tijekom provedbe eksperimenata solarne fotokatalize pri: (a) 50 % vlage i (b) 90 % vlage; korištena je emulzija C1.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da se pri 90% vlage herbicid brže razgrađuje već u prvoj fazi fotokatalize, odnosno da je manja razlika između dobivenih mjerena TVOC-a i relevantne bazne linije nego u eksperimentima s 50% vlage. Drugu fazu fotokatalize karakterizira očekivana kinetika razgradnje koja slijedi eksponencijalni trend pada koncentracije onečišćivila. Na slikama je prikazana jednadžba brzine razgradnje oblika (8):

$$C(t) = C(0) e^{-kt} \quad (8)$$

Približne konstante brzina razgradnje ( $k$ ) su  $0,0029$  i  $0,0066 \text{ min}^{-1}$  za  $50$  i  $90\%$  RH, što govori o izrazito značajnom utjecaju količine molekula  $\text{H}_2\text{O}$  u sustavu. Osim toga, na kraju eksperimenata vidljivo je kako izmjerene vrijednosti TVOC padaju ispod TVOC vrijednosti relevantne bazne linije, što ukazuje na učinkovitu razgradnju i herbicida i hlapivih komponenti fotokatalitičkog filma u eksperimentima s  $90\%$  RH. Vlažnost od  $50\%$  RH u sustavu nije se pokazala dovoljna za uspješnu razgradnju pesticida tijekom  $150$  min ukupnog trajanja fotokatalize.

### 3.2. Uklanjanje pesticida pri optimalnim uvjetima

Utvrđeni optimalni uvjeti za provedbu solarne fotokatalitičke razgradnje herbicida su  $75$  -  $100\%$  RH, što odgovara prosječno izmjerenim  $90\%$  RH tijekom trajanja eksperimenata, te vrijeme adsorpcije herbicida u mraku u trajanju od  $60$  minuta kako bi se postigla adsorpcijska ravnoteža i dobila stabilna očitanja TVOC-a. Zadnji set eksperimenata proveden je uz korištenje smjese herbicid-voda C2, odnosno  $2,5 : 300$  (mL/mL). Osim toga smjesa u ulaznoj komori je grijana na  $80^\circ\text{C}$  kako bi se postiglo maksimalno zasićenje vodenom parom/vlagom u sustavu. Također su tokom eksperimenata, pomoću uređaja GA-5000, mjerene koncentracije  $\text{O}_2$  i  $\text{CO}_2$ . Zasićenost kisikom kretala se između  $18,6$  i  $19,8\%$ , dok je razina  $\text{CO}_2$  porasla tijekom fotokatalitičkog procesa od  $0,1$  do  $0,2\%$ . Promjena navedenih vrijednosti tijekom provedbe eksperimenata nije dovoljna kako bi se sa sigurnošću utvrdio utjecaj kisika na stvaranje reaktivnih radikala i oksidacijskih vrsta prema jednadžbama (4) – (7). Međutim porast izmjerene vrijednosti  $\text{CO}_2$  od  $0,1\%$  preračunato koristeći opću plinsku jednadžbu (9), te uzimajući u obzir atmosferski tlak ( $101\ 325$  Pa), prosječnu temperaturu unutar reakcijskog prostora ( $300\text{ K}$ ), odgovara ukupnoj množini od  $2,56 \times 10^{-5}$  mol.

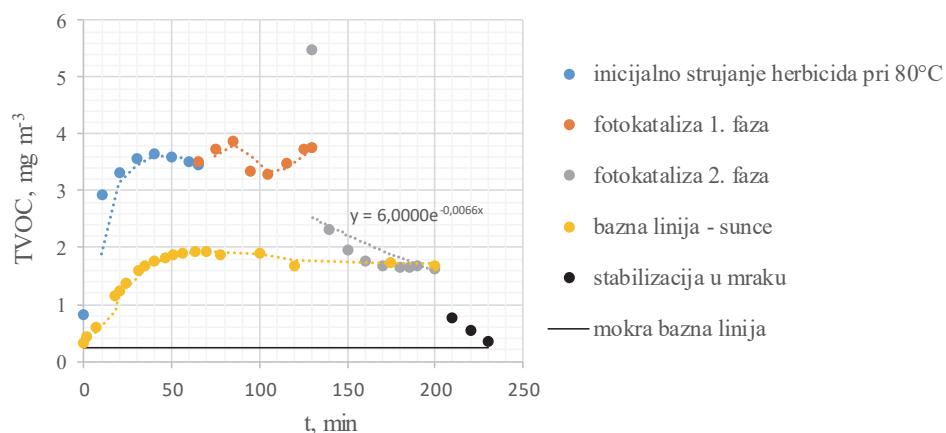
$$p V = n R T \quad (9)$$

Ukupna jednadžba razgradnje herbicida odnosno približna stehiometrija prikazana je jednadžbom (10).



Prilikom potpune oksidacije herbicida trebalo bi se razviti 17 puta više molova  $\text{CO}_2$ . Uzevši u obzir ukupnu vrijednost TVOC-a isparenog herbicida tijekom isparavanja u mraku, preračunato na  $4,78 \times 10^{-10}$  mol, odgovarajuća količina razvijenog  $\text{CO}_2$  iznosi  $8,13 \times 10^{-9}$  mol, što je više od 3000 puta manje od izmjerene koncentracije  $\text{CO}_2$  u sustavu. Čak i pod pretpostavkom potpune razgradnje herbicida, promjena  $\text{CO}_2$  ne bi se mogla detektirati. Dobiveni rezultati porasta vrijednosti  $\text{CO}_2$  u sustavu su zapravo potvrda odvijanja kompetitivnih reakcija razgradnje zaostalih hlapivih komponenti fotokatalitičkog filma (octena kiselina, TEOS).

Ukupni rezultati seta eksperimenata provedenih pri optimalnim uvjetima prikazani su na **Slici 6**.



**Slika 6.** Rezultati mjerena TVOC-a pri optimalnim uvjetima ( $75$  -  $100\%$  RH, prosječno  $\sim 95\%$  RH), uz grijanje ( $80^\circ\text{C}$ ) i povećanje koncentracije otopine pesticida ( $C2 = 2,5:300$  mL/mL)

Rezultati eksperimenata provedenih pri utvrđenim optimalnim uvjetima ukazuju na slijedeće; povećanjem koncentracije pesticida raste broj molekula TVOC-a, dok se zagrijavanjem smjese u komori za isparavanje povećava protok herbicida u sustavu i količina vlage odnosno količinu molekula vode na površini fotokatalizatora. U prvoj fazi fotokatalize vidljive su varijacije u vrijednostima TVOC-a. Razlog tomu može biti „gomilanje“ molekula herbicida u sustavu, budući da se zagrijavanjem povećava brzina isparavanja i ukupan protok herbicida na ulazu u anularni prostor, te kompeticija između molekula vode i onečišćiva za adsorpcijska mesta na površini fotokatalizatora zbog čega nastaju varijacije u koncentraciji TVOC-a. S druge strane, pojava kompetitivnih reakcija razgradnje hlapivih komponenti fotokatalitičkog filma utječe na cijelokupnu učinkovitost razgradnje ciljanog onečišćiva. Rezultati druge faze fotokatalitičke razgradnje u skladu su s očekivanim trendom razgradnje organskih onečišćiva putem radikalског mehanizma. Vidljiv je eksponencijalni trend pada koncentracije onečišćiva, no uspješna razgradnja (prelazak bazne linije-sunce) postignuta je nešto kasnije nego u prethodnim eksperimentima (**Slika 5**), točnije oko 180. minute. Razlog tome su već spomenute povećane količine molekula onečišćiva i vode u sustavu. Pokazatelj uspješnosti fotokatalitičke razgradnje herbicida je procijenjena približna konstante brzina razgradnje  $k = 0.0066 \text{ min}^{-1}$ . Dobivena vrijednost  $k$  je u skladu s prethodnim eksperimentima provedenim pri 75 % RH. Relativna vlažnost zraka u sustavu u rasponu od 75 – 100 % pokazala se optimalnom, što je dokazano uspješnom provedbom druge faze fotokatalitičke razgradnje neovisno o početnoj koncentraciji isparenog herbicida u sustavu.

Dio struje zraka onečišćenog herbicidom odlazi u ispiralicu i tamo se otapa u destiliranoj vodi, pri čemu su vrijednosti ukupnog organskog ugljika u vodenoj otopini iz ispiralice konačna potvrda uspješnosti procesa solarne fotokatalize. U **Tablici 1** su prikazana mjerena ukupnog organskog ugljika (TOC) u uzorcima vode iz ispiralice nakon strujanja onečišćenog zraka kroz prazni reaktor, preko mreže s fotokatalitičkim filmom u mraku (adsorpcija), te nakon cijelokupnog procesa fotokatalize provedenog pri 50 i ~95% RH.

**Tablica 1. Rezultati mjerena TOC vrijednosti u uzorcima vode iz ispiralice prije i nakon procesa fotokatalize**

Mjerena veličina	Inicijalno strujanje herbicida	Nakon adsorpcije	Fotokatalitička razgradnja (> 50 % RH)	Fotokatalitička razgradnja (> 90 % RH)	Destilirana voda
TOC, mg C dm <sup>-3</sup>	0,468	0,418	0,380	0,352	0,277

Izmjerene vrijednosti TOC-a ukazuju na vrlo mali porast ukupnog sadržaja organske tvari u ispiralici nakon provedene fotokatalitičke razgradnje herbicida u strui zraka u odnosu na vrijednosti TOC čiste destilirane vode. Dobivene vrijednosti su u skladu s očekivanim rezultatima; najviša je vrijednost dobivene nakon strujanja herbicida u praznom sustavu, u odsustvu adsorpcije i fotokatalize. Tijekom strujanja herbicida preko mreže fotokatalizatora u mraku dio herbicida se adsorbira na površinu fotokatalitičkog filma, i vrijednosti TOC-a u ispiralici su nešto niže. Najniže su vrijednosti dobivene nakon provedene fotokatalize pri optimalnim uvjetima. Treba uzeti u obzir da su dobivene vrijednosti ukupne i odnose se na sva organska onečišćiva otopljena u vodi. Obzirom da su osim ciljanog onečišćiva (herbicida) u strui zraka prisutne i druge hlapive komponente, ali i svi nastali međuproizvodi razgradnje, solarna fotokataliza pokazala se kao uspješna metoda pročišćavanja zraka onečišćenog VOC-evima.

#### 4. ZAKLJUČAK

Rezultati ovog rada dokazuju mogućnost fotokatalitičke razgradnje tragova herbicida iz zraka. Ovaj rad je potvrdio potencijal koji ova tehnologija posjeduje, a jedna od glavnih prednosti procesa je jednostavnost. Mnogo je parametara i čimbenika koji utječu na učinkovitost fotokatalitičke razgradnje, a koji u konačnici određuju primjenu ove tehnologije u praksi. Iako je poznato kako na učinkovitost fotokatalize utječe geometrija fotoreaktora, vrsta fotokatalizatora, brzina protoka zraka, relativna vlaga, koncentracija i vrsta onečišćiva te intenzitet i valna duljina zračenja, svrha ovog rada nije bila postići najučinkovitiju fotokatalitičku razgradnju odabranog onečišćiva-herbicida već potvrditi mogućnost primjene ove tehnologije za pročišćavanje zraka. Iz tog razloga se u ovome radu pažnja usmjerila na postizanje optimalne relativne vlage dok se ostali utjecajni parametri nisu značajno mijenjali. Provedbom niza eksperimenata, na primjeru razgradnje herbicida, dokazalo se kako je fotokatalitička razgradnja hlapivog organskog onečišćiva prisutnog u zraku najbrža pri optimalnoj relativnoj vlažnosti zraka koja se kreće u rasponu od 75-100 %.

Za uspješnu provedbu fotokatalitičke razgradnje onečišćiva u zraku potrebno je Sunčevu zračenje, prisutnost vlage, kisik te fotokatalitički materijal. Prirodni okoliš posjeduje gotovo sve uvjete što omogućuje primjenu ove tehnologije u prirodi. Jedna od mogućih ideja za primjenu je izrada fotokatalitičkih mreža-prevlaka za poljoprivredne površine koje bi na principu fotokatalitičke oksidacije mogle sprječavati emisiju VOC-eva iz tla u prizemnim slojevima troposfere.

## 5. LITERATURA

- Arias-Estévez M, López-Periago E, Martínez-Carballo E, Simal-Gándara J, Mejuto CJ, García-Río L (2008) The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agric Ecosyst Environ* 123(4):247–260
- Boonen E, Beeldens A (2013) Photocatalytic roads: from lab tests to real scale applications. *Eur Transp Res Rev* 5:79–89
- Boyjoo Y, Sun H, Liu J, Pareek VK, Wang S (2016) A Review on Photocatalysis for Air Treatment : From Catalyst Development to Reactor Design. *Chem Eng J* 310: 537-559
- Brinkmann T, Santonja G, Yükseler H, Roudier S, Sancho LD (2016) Best available techniques (BAT) reference document for common waste water and waste gas treatment/management systems in the chemical sector. European Commission
- European Environment Agency (2017) Air pollution. Available via: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/intro>. Cited 21 Jul 2018
- Folli A, Strøm M, Pilegaard Madsen T, Henriksen T, Lang J, Emenius J, Klevebrant T, Nilsson Å (2015) Field study of air purifying paving elements containing TiO<sub>2</sub>. *Atmospheric Environ* 107(2): 44–51
- Grčić I, Papić S, Brnardić I (2017) Photocatalytic Activity of TiO<sub>2</sub> Thin Films : Kinetic and Efficiency Study. *Int J Chem Reactor Eng* 20160153, doi: 10.1515/ijcre-2016-0153
- Kampa M, Castanas E (2008) Human health effects of air pollution. *Environ Pollut* 151(2): 362–367
- Kamrin MA (1997) Pesticide Profiles: Toxicity, Environmental Impact, and Fate. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, New York
- Kim KH, Kabir E, Jahan SA (2017) Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Sci Total Environ* 575: 525–535
- McCullagh C, Skillen N, Adams M, Robertson PKJ (2011) Photocatalytic reactors for environmental remediation : a review. *J Chem Technol Biotechnol* 86: 1002–1017
- Schneider J, Bahnemann D, Ye J, Li Puma G, Dionysiou DD (2016) Photocatalysis: Fundamentals and Perspectives. Royal Society of Chemistry, Cambridge
- Vallero D (2008) Air Pollution Essentials. In: Fundamentals of Air Pollution: Air Pollution Essentials. Fourth edition. Elsevier inc. 3–87.
- VanLoon GW, Duffy SJ (2000) Environmental Chemistry – A Global Perspective. Oxford University Press, Oxford
- Wang S, Ang HM, Tade MO (2007) Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: State of the art. *Environ Int* 33(5): 694–705

# LABORATORIJ ZA INŽENJERSTVO OKOLIŠA



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
Geotehnički fakultet



STUDIJ  
INŽENJERSTVA  
OKOLIŠA

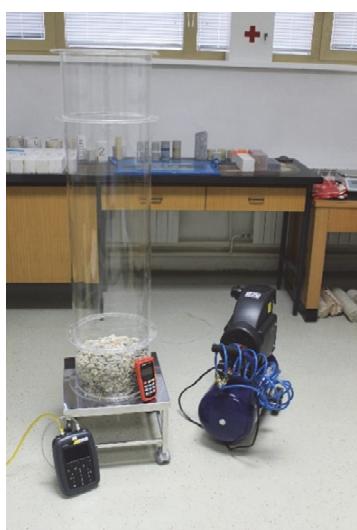


**Laboratorij za inženjerstvo okoliša (LIO) je osnovan 2018. godine**

**Opremljen je za rad na istraživačkim i stručnim projektima u području:**

energetike, razvoja i primjeni senzora za određivanje i praćenje komponenti u okolišu, fotokatalitičkog (procesnog) inženjerstva, pročišćavanja tj. uklanjanja specifičnih onečišćivila iz zraka i voda, mehanička, biološka i termička obrada otpada, analize svih vrsta otpada, ispitivanja novih mogućnosti obrade i recikliranja otpada, s naglaskom na cirkularnu ekonomiju (umješavanje otpada u betonske proizvode i ispitivanje „novih“ proizvoda)

**Plan razvoja LIO** uključuje komercijalizaciju usluga laboratorija, rad na inovacijama i suradnju sa komunalnim poduzećima i tvrtkama koje se bave djelatnošću gospodarenja otpadom ili planiraju uvođenje novih tehnologija u području zaštite okoliša.



**Analize & tehnička rješenja:**

- Simulacija procesa biosušenja
- Osnovni fizikalni pokazatelji otpada (vlažnost, gustoća – minimalna, maksimalna, čestica, granulometrija, sadržaj organskih tvari)
- Deformabilnost otpada – edometarski pokus
- Posmična čvrstoća MBO otpada – triaksijalni CD, CU i UU pokus
- Propusnost MBO otpada
- Geomehaničke analize brtvenih slojeva na odlagalištima otpada
- Mjerenje odlagališnih plinova i ostalih emisija u zrak
- Stručna mišljenja i vještačenja
- Fotokatalitički procesi za pročišćavanje voda i zraka
- Eksperimentalni sustavi za ispitivanje alternativnih NRT-a za vode i zrak
- Optimalni flat-plate i CPC pilot reaktori u primjeni solarne fotokatalize
- Vakuumska piroliza otpada
- Senzori u okolišu



# POJEDNOSTAVLJENI POSTUPAK ODABIRA OPTIMALNE VARIJANTE VODOOPSKRBNOG SUSTAVA POKRETANOG SOLARNOM FOTONAPONSKOM (FN) ENERGIJOM

## SIMPLIFIED PROCEDURE OF SELECTION OF THE OPTIMUM VARIANT OF WATER SUPPLY SYSTEM POWERED BY SOLAR PHOTOVOLTAIC (PV) ENERGY

Bojan Đurin <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

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

**Sažetak:** Rad prikazuje pojednostavljenu metodologiju odabira optimalne varijante vodoopskrbnog sustava, koji kao izvor energije koristi solarnu fotonaponsku (FN ili PV) energiju. Analizira se uobičajeni hibridni sustav koji se sastoji od solarnog fotonaponskog (FN ili PV) generatora i invertora, crpne stanice i vodospreme. Korištenjem Metode Kritičnog Perioda postiže se sustavna održivost takvog sustava. Pri tome se dobije pet, a po potrebi i više varijanti rješenja. Potrebno je uzeti u obzir činjenicu da je uz troškove, kao jednog od odlučujućih čimbenika, nužno razmotriti i ostale kriterije koji moraju biti zadovoljeni. To su u pravilu ekološki i socijalni kriteriji. Samim time, nameće se primjena višekriterijske metode, koja bi kod odabira i rangiranja dobivenih varijanti uzela u obzir sva tri navedena kriterija. Kao jedna od najprikladnijih višekriterijskih metoda odabrana je metoda PROMETHEE, koja će se primijeniti na primjeru vodoopskrbnog sustava naselja.

**Ključne riječi:** vodoopskrbni sustav, solarna fotonaponska energija, Metoda Kritičnog Perioda, višekriterijska analiza, PROMETHEE

**Abstract:** The paper presents a simplified methodology for selection of the optimal variant of the water supply system, which uses solar photovoltaic (FN or PV) energy as a source of energy. An usual hybrid system, which consists of a solar photovoltaic (FN or PV) generator and inverter, pumping station and water reservoir is analyzed. By using the Critical Period Method, a systemic sustainability of such a system is achieved. There are five, and if is required, several variants of the solution. It is necessary to take into account the fact that besides the costs, as one of the decisive factors, it is necessary to consider other criteria that must be satisfied. These are, generally, ecological and social criteria. Therefore, the application of the multi-criteria method will be applied, which would take into the account all three mentioned criteria during selection and ranking of the obtained variants. As one of the most appropriate multi-criteria methods, the PROMETHEE method was chosen, which will be applied on the example of a water supply system of the settlement.

**Keywords:** water supply system, solar photovoltaic energy, Critical Period Method, multicriteria analysis, PROMETHEE

---

Received: 08.11.2016. / Accepted: 18.6.2018.

Published online: 17.12.2018.

---

Pregledni rad / Review paper

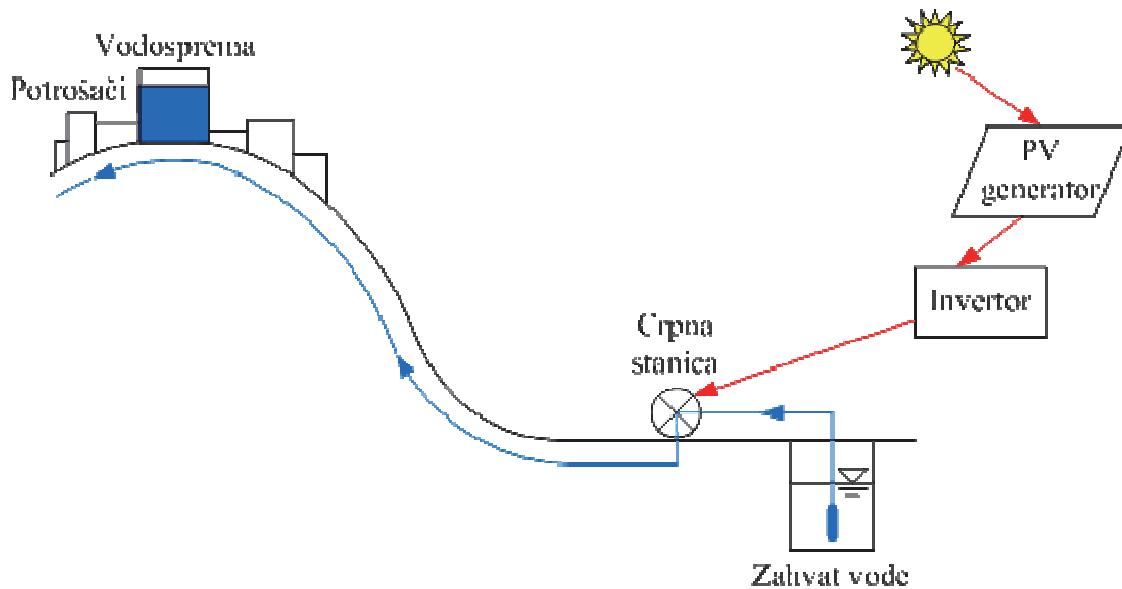
## 1. UVOD

Predmet analiziranja ovog rada je primjena višekriterijskih metoda u svrhu odabira optimalne varijante vodoopskrbnog sustava pokretanog solarnom fotonaponskom (FN ili PV) energijom. U tu svrhu koristit će se višekriterijske metode PROMETHEEuz korištenje programskog paketa Visual PROMETHEE 1.0 (Mareschal 2012). Analizira se hibridni sustav PV: PV generator i inverter-Vodosprema-Crpna stanica (Slika 1), Đurin i Margeta (2012). U ovom sustavu koristi se PV energija, koja se posredstvom PV generatora i invertora pretvara u električnu energiju. Crpna stanica koristi dobivenu električnu energiju za prečrpavanje vode u vodospremu, nakon čega se voda distribuira do potrošača.

Na osnovu analize provedene u Đurin i Margeta (2012) korištenjem Metode Kritičnog Perioda (MKP) dobiveno je pet varijanti rješenja tj. pet alternativa rješenja prikazanog hibridnog sustava za pet različitih perioda bilanciranja  $t_b$  ( $t_b = 1, 2, 3, 4 \text{ i } 5$  dana). Osim u odnosu na ekonomski kriterij (u ovom slučaju to je iznos životnog ciklusa troškova (LCC)), dobivene varijante razlikuju se u odnosu na ekološke i socijalne pokazatelje. Navedeni kriteriji nisu usporedivi na osnovu kvantitativnih pokazatelja. Zbog navedene činjenice potrebno je primijeniti višekriterijske metode. U ovom slučaju, odabir optimalne varijante rješenja izvršit će se primjenom višekriterijske metode PROMETHEE.

Razlika između uobičajenih metoda dimenzioniranja vodoopskrbnih sustava koji koriste PV energiju i MKP je u tome što se kod MKP svaki od podsustava dimenzionira s obzirom na kritični period svakoga od njih, pri

čemu se preko povezanosti između podsustava PV generator i podsustava Vodosprema definira potrebna snaga PV generatora, nakon toga veličina volumena vodospreme te na kraju snaga crpne stанице. Navedeno se određuje s obzirom na periode bilanciranja  $t_b$ . Oni predstavljaju vremenski period unutar kojega se radi ujednačavanje dotoka i potrošnje vode, odnosno proizvedene i potrebne energije. Zbog opsega i namjene ovog rada, ova metoda se neće dalje objašnjavati, pri čemu se detalji i detaljna objašnjenja mogu naći u [Durin i Margeta \(2012\)](#).



*Slika 1. Hibridni sustav PV generator-vodosprema-crpana stanica*

Kod uobičajenih metoda dimenzioniranja u većini slučajeva rade se osrednjavanja ulaznih podataka, a naročito jakosti Sunčevog zračenja, kao što je to primjerice opisano u ([Ebaid et al. 2013](#) i [Escudero-Pascual 2005](#)). Tu se koristi metoda tzv. "najgoreg mjeseca". Pri tome se uzima u obzir srednja mjesecna jakost Sunčevog zračenja. Pristup "najgoreg mjeseca u godini" podrazumijeva dimenzioniranje podsustava "PV generator" tako da on ima dovoljnu potrebnu snagu da može zadovoljiti najveću mjesecnu potrebu za električnom energijom tijekom promatrane godine, ali potrebno je uzeti u obzir da se dimenzioniranje radi s obzirom na mjesec u kojem je prosječna mjesecna jakost Sunčevog zračenja najmanja tijekom te godine. Ovakvim načinom dimenzioniranja ide se na stranu sigurnosti uz izvjesno osrednjavanje rezultata, no prema Escudero-Pascual, 2005. to olakšava postupak dimenzioniranja ovakvih sustava.

[Hamidat & Benyoucef \(2009\)](#) opisuju mogući postupak dimenzioniranja vodoopskrbnog sustava koji se sastoji od podsustava "PV generator i invertor", podsustava "Crpana stanica" i podsustava "Vodosprema", ali za pojednostavljeni i nerealnu shemu potrošnje vode u naselju. Naime, on dimenzionira sustav uz pretpostavku da se voda kontinuirano troši 24 sata ili da se kontinuirano troši u periodu od 6 sati pa do 21 sat, što nije stvarna situacija. Navedena metoda MKP otklanja ove nedostatke i povećava pouzdanost rada takvih sustava.

Višekriterijske metode puno se koriste kod odabira i rangiranja dobivenih varijantnih rješenja, pri čemu je metoda PROMETHEE jedna od najčešće korištenih, bez obzira da li se radi o lokalnim vodoopskrbnim sustavima ili o većim vodoopskrbnim sustavima, koji koriste PV energiju kao glavni izvor energije ili jedan od izvora energije ([Andreopoulou et al. 2017](#); [Cavallaro 2013](#); [Kolios et al. 2016](#)) i mnogi drugi).

## 2. METODOLOGIJA

Višekriterijska analiza je matematički alat donošenja odluka koji omogućuje usporedbu različitih alternativa ili scenarija prem arazličitim kriterijima (često proturječnim), koji donositelja odluke usmjeravaju prema ispravnom odabiru odluke. Višekriterijska analiza provodi se korištenjem višekriterijskih metoda [Roy \(1996\)](#). Višekriterijske metode omogućavaju postavljanje različitih opcija i definiranje njihovog odnosa sa različitim kriterijima, što u konačnici zahtijeva određenu procjenu. Višekriterijske metode međusobno se razlikuju u načinu obrade ulaznih podataka. Najčešće se radi o definiranju sustava relativnih težina za različite kriterije. Glavni zadatak višekriterijskih metoda je rješavanje problema koje donositelji odluka imaju kod obrade velike količine složenih informacija s težnjom dosljednosti i sistematičnosti. Višekriterijske metode primjenjuju se kod određivanja pojedinačne željene opcije, kod rangiranja opcija, kod smanjenja broja opcija za naknadne analize, odnosno za razlikovanje prihvatljivog rješenja od neprihvatljivog, [Department for Communities and Local Government \(2009\)](#).

U najopćenitijem slučaju, promatra se jednokriterijski problem ([Mladineo 2009](#)):

$$\text{Max} \{f(a), a \in A\} \quad (1)$$

gdje su:

$A$  skup mogućih akcija (alternativa), dok je  $f: A \rightarrow R$ , kriterij koji razlikuje te akcije. Rješenje ovog problema je totalni poredak u skupu  $A$ . Višekriterijski problem definira se kao ([Mladineo 2009](#)):

$$\text{Max} \{f_1(a), \dots, f_j(a), \dots, f_k(a), a \in A\} \quad (2)$$

pri čemu je  $f_j(a)$ ,  $j = 1, 2, \dots, k$ , gdje je  $k$  broj kriterija. U ovom slučaju ne može se dobiti rješenje u obliku totalnog poretku u skupa  $A$ . Međutim, ovakvi (višekriterijski) problemi mogu se riješiti. Neka su  $a$  i  $b$  dvije akcije iz skupa  $A$  tako da vrijedi  $f_j(a) \geq f_j(b), \forall j \in \{1, 2, \dots, k\}$ , pri čemu je barem jedna nejednakost stroga. Tada vrijedi da  $a$  dominira nad  $b$ . Na taj se način dobiva parcijalni poredak u  $A$  (tranzitivna relacija) koji se zove poredak dominacije. Pretpostavi se da su akcije iz  $A$  ponovo čvorovi grafa, luk  $(ab)$  postoji ako  $a$  dominira nad  $b$  te se tako dobiva graf dominacije (usmjereni graf).

Postoje različite podjele višekriterijskih metoda. Uzveši u obzir problematiku analiziranu u ovom radu, prikazat će se podjela prema [Lai \(2008\)](#) na elementarne metode, pojedinačni kriterijski pristup, metode "višeg ranga", metoda cilja ili referentne točke i teoriju "Fuzzy" skupa. Metoda PROMETHEE I njezin program, tj. prateći alat ili programska podrška za „vizualnu analizu“ rezultata GAIA pripadaju u skupinu metoda "višeg ranga". U ovom radu metoda PROMETHEE primjeniti će se na odabir optimalnog rješenja prikazanog hibridnog sustava. Opravdanost navedenih višekriterijskih metoda vidljiva je u prikladnosti i prilagodljivosti primjene na opisanu problematiku odabira optimalne varijante analiziranog hibridnog sustava, kao i u mogućnosti informatičke (softverske) podrške imajući u vidu programski paket Visual PROMETHEE 1.0.

## 2.1. Metoda PROMETHEE

Ova metoda koristi princip "višeg ranga" u svrhu rangiranja alternativa u kombinaciji s jednostavnošću uporabe i smanjenja složenosti. Drugim riječima, izvršava se paralelna usporedba alternativa u svrhu njihovog rangiranja u odnosu na broj kriterija ([Lai 2008](#)).

Za metodu PROMETHEE karakteristična su slijedeća tri segmenta:

- Obuhvat kriterija: Oblikovanje preferencija donositelja odluke bit će modificirano na način da će se za svaki kriterij promatrati šest mogućih obuhvata (funkcija preferencije) zasnovanih na intenzitetu preferencije. Neke od njih dopuštaju netranzitivnost indiferencije, dok druge nude blagi prijelaz iz indiferencije u strogu preferenciju.

- Procijenjena relacija "višeg ranga": Upotreba kriterija definiranih na način kao što je definirano u prethodnoj točki dozvoljavakonstrukciju procijenjene relacije "višeg ranga". Ova relacija biti će manje osjetljiva na male promjene parametara i njena interpretacija će biti jednostavna.

- Korištenje relacije "višeg ranga": Pod ovim pojmom razmatrat će se specifičnokorištenje procijenjene relacije "višeg ranga", naročito u slučaju kada akcije moraju biti rangirane od najbolje do najgore. Metoda PROMETHEE I omogućava djelomično rangiranje akcija. Potpuno rangiranje dobije se pomoću metode PROMETHEE II.

Obuhvat kriterija temelji se na uvođenju funkcije preferencije, koja daje preferenciju donositelja odluke za akciju  $a$  u odnosu na akciju  $b$ . Ova će funkcija biti definirana za svaki kriterij posebno; njena će se vrijednost kretati između 0 i 1. Što je manja vrijednost funkcije, veća je indiferencija donositelj odluke; što je ta vrijednost bliže 1, veća je njegova preferencija. U slučaju stroge preferencije, vrijednost funkcije preferencije biti će jednaka 1 ([Mladineo 2009](#)).

Neka je  $f$  određeni kriterij, a  $a$  i  $b$  dvije akcije (alternative) iz skupa akcija  $A$ . Pridružena funkcija preferencije  $P(a, b)$  od  $a$  u odnosu na  $b$  bit će definirana kao:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ako je } f(a) \leq f(b) \\ p[f(a), f(b)] & \text{ako je } f(a) > f(b) \end{cases} \quad (3)$$

Za konkretne slučajeve potrebno je izabrati funkcije p tipa:

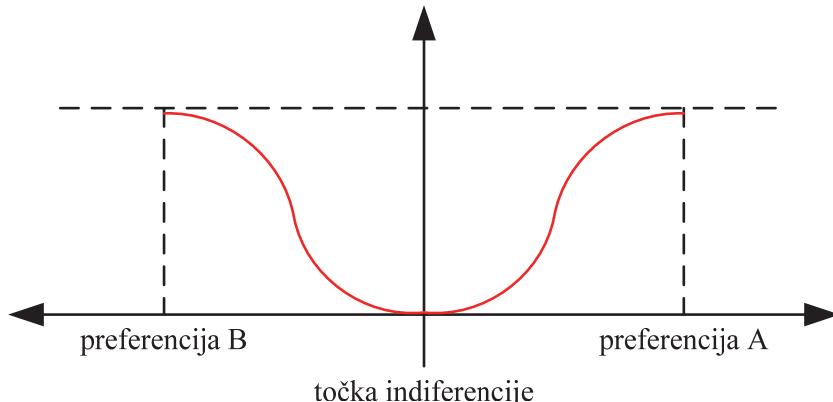
$$p[f(a), f(b)] = p[f(a) - f(b)] \quad (4)$$

kod kojih je  $p$  u ovisnosti o razlici između vrijednosti  $f(a)$  i  $f(b)$ . Područja indiferencije  $d$  u okolini  $f(b)$  definira se preko:

$$d = f(a) - f(b) \quad (5)$$

Izraz (6) predviđava funkciju  $H(d)$  ([Slika 2](#)):

$$H(d) = \begin{cases} P(a, b), & \text{ako je } d \geq 0 \\ P(a, b), & \text{ako je } d \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$



*Slika 2. Prikaz funkcije  $H(d)$*

Prema Mladineo (2009), Brans et al. (1986) i Mareschal (2012), definirano je šest kriterija:

1. Običan kriterij: Kod ovog kriterija nema praga (parametra) za donošenje odluke. Ovaj kriterij ekvivalentan je postupku optimizacije - što je veća vrijednost to je bolje za odabir pripadne varijante. Navedeni postupak je mjerodavan kod kriterija sa jako malo različitih procjena. Ovo je česti slučaj kod kvalitativnih kriterija.
2. Kvazi kriterij ("U" oblik funkcije preferencije  $p$ ): Kod ovog kriterija prag (parametar) za donošenje odluke je  $q$ . Kod ovog kriterija uvodi se značaj praga (parametra) ili točke indiferencije.
3. Kriterij s linearnom preferencijom ("V" oblik funkcije preferencije  $p$ ): Kod ovog kriterija prag (parametar) za donošenje odluke je  $p$ . "V" oblik funkcije preferencije je posebni slučaj kriterija 5 gdje je  $q = 0$ . Kriterij 3 pogodan je u onim slučajevima gdje je potrebno uzeti u obzir i najmanje odstupanje.
4. Kriterij razina: Kod ovog kriterija pragovi (parametri) za donošenje odluke su  $p$  i  $q$ . Ova funkcija preferencije pogodnija je kod kvalitativnih kriterija gdje donositelj odluke želi postaviti stupanj preferencije u odnosu na odstupanje između razina usvajanja.
5. Kriterij s linearom funkcijom preferencije i područjem indiferencije: Kod ovog kriterija pragovi (parametri) za donošenje odluke su  $p$  i  $q$ . Linearna funkcija preferencije je najbolji slučaj za kvantitativni kriterij gdje je  $q$  u skladu sa preferencijama (željama).
6. Gaussov kriterij: Kod ovog kriterija prag (parametar) za donošenje odluke je  $\sigma$ . Gaussova funkcija preferencije je zamjena za linearu funkciju (kriterij 5). Ova funkcija ima zaglađeniji oblik, no u ovom slučaju teže ju je postaviti budući da se Gaussova funkcija oslanja na  $\sigma$  koja se nalazi između  $q$  i  $p$  i koja ima manje očitiju (vidljiviju) interpretaciju. Ova funkcija rijetko se koristi.

Idući korak je procjena relacije "višeg ranga". Za svaki par akcija  $a, b \in A$ , prvo se definira višekriterijski indeks preferencije za  $a$  u odnosu na  $b$  za sve kriterije. Pretpostavlja se da je svaki kriterij identificiran kao jedan od razmotrenih tipova kriterija, tako da su funkcije preferencije  $P_j(a, b)$  definirane za svaki  $j = 1, 2, \dots, k$ . Višekriterijski indeks preferencije  $\Pi(a, b)$  definiran je slijedećim izrazom:

$$\Pi(a, b) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_j(a, b) \quad (7)$$

gdje je  $k$  broj kriterija.

Ako se pretpostavi da se funkcije preferencije  $P_j(a, b)$  i ponderi (težine) kriterija  $W_j$  specificiraju za svaki kriterij  $j = 1, \dots, k$ , tada se za  $\forall a, b \in A$  višekriterijski indeks preferencije  $\Pi(a, b)$  definira kao:

$$\Pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^k W_j P_j(a, b)}{\sum_{j=1}^k W_j} \quad (8)$$

gdje je  $W_j$  ponder (težina) kriterija.

Ako donositelj odluke želi rangirati akcije iz A od najbolje do najlošije, to je onda problem rangiranja. Ako donositelj odluke mora izabrati najbolje akcije iz A, govori se o problemu izbora. Budući da kod višekriterijskog problema općenito nema najboljeg rješenja, problem će se sastojati od određivanja skupa dobrih akcija iz A. U tu svrhu upotrijebit će se dvije tehnike rješavanja problema rangiranja, pri čemu se rangiranjem može dobiti i skup dobrih akcija kao rješenje problema izbora. To su metoda PROMETHEE odnosno metoda PROMETHEE I i metoda PROMETHEE II. Kod metode PROMETHEE I radi se o rangiranju akcija djelomičnim poretkom. Ako se definira procijenjena relacija "višeg ranga", za svaki čvor a, na osnovu višekriterijskog indeksa preferencije za svaki  $a \in A$  dobiju se slijedeći tokovi:

- Izlazni tok:

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(a, x) \quad (9)$$

- Ulazni tok:

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(x, a) \quad (10)$$

Što je veći izlazni tok, to a više dominira nad ostalim akcijama iz A; što je manji ulazni tok, to manje akcija dominira nad a. Neke akcije će biti usporedive, a neke neusporedive tako da metoda PROMETHEE I dajedjelomične relacije odnosno procijenjenu relaciju "višeg ranga" koji donositelju odluke daje značajne informacije o odnosima među akcijama.

Kod metode PROMETHEE II radi se o rangiranju akcija potpunim poretkom (potpuno rangiranje bez neusporedivosti). Za svaku akciju  $a \in A$  promatra se rezultirajući (netto) tok:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (11)$$

koji se koristi u rangiranju akcija:

- a ima viši rang od b ( $aP^{(2)}b$ ) akko  $\Phi(a) > \Phi(b)$ ;
- a je indiferentno b ( $aI^{(2)}b$ ) akko  $\Phi(a) = \Phi(b)$ .

U metodi PROMETHEE II definirana je potpuna relacija kod koje su sve akcije iz A potpuno rangirane, uz napomenu da se kod ove relacije gubi dio informacija zbog balansirajućih efekata između izlaznog i ulaznog toka što rezultira većim stupnjem apstrakcije (Mladineo 2009).

## 2.2. Program GAIA

Program GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) daje geometrijsku prezentaciju rezultata metode PROMETHEE, odnosno metoda PROMETHEE I i PROMETHEE II. Ideja na kojoj se zasniva program je svođenje višedimenzionalnog problema na dvodimenzionalni kako bi se omogućila ravninska prezentacija. Dimenzija višekriterijske analize određena je brojem kriterija (svaki kriterij određuje jedanvektor u takvom prostoru) i ukoliko se želi vjerodostojna geometrijska prezentacija, problem je potrebno svesti u dvodimenzionalni prikaz (eventualni trodimenzionalna prikaz bio binepregledan). Pri ovom smanjivanju dimenzije nužan je izvjestan gubitak informacija osamom problemu. Da bi ovaj gubitak bio što manji, ravnina u kojoj se daje geometrijskaprezentacija određena je dvama najvećim svojstvenim vrijednostima kovarijacijske matrice. Pritome program daje podatak o postotku informacije kojeg takav prikaz daje. Osim pri izuzetnonepovoljnoj strukturi problema, geometrijska prezentacija daje dovoljno visok postotak informacija za analiziranje problema. Također je moguće povezati metodu GAIA s metodom PROMETHEE II. PROMETHEE II zahtijeva da se svakom kriteriju pridruži određeni ponder (težina)  $W_j$  i definira kompletan porekad u skupu A.

Ponderi (težine) također se mogu prikazati u  $(u, v)$  ravnini pomoću tzv. vektora odluke, kojisu usmjereni u smjeru najbolje rangiranih aktivnosti. Na taj je način moguće interaktivnim mijenjanjem pondera promatrati promjene ranga dobivenem metodom PROMETHEE II. Opisanim načinom izbora ravnine za geometrijsku prezentaciju višekriterijskog problema postiže minimalni gubitak informacije (u smislu metode najmanjih kvadrata), što znači da se (uz nužneizvjesne gubitke pri smanjenju dimenzije problema) čuvaju i "međusobni odnosi" kriterija, kao iznačaj svakog kriterija u odnosu na ostale. Konfliktni kriteriji će u ovakvoj prezentaciji imati bitno različiti smjer (mala kovarijanca među kriterijima uzrokuje i malu vrijednost skalarnog produkta vektora koji ih prezentiraju), a međusobno suglasni kriteriji prezentirani su vektorima bliskog smjera. Značaj kriterija za donošenje odluke geometrijski je reprezentiran duljinom vektora, tako dadominirajućim kriterijima odgovaraju i vektori veće apsolutne vrijednosti. Zbrajanjem vektora koji prezentiraju kriterije, dolazi se do sumarnog vektora čiji smjer i iznos opisuju rezultantno djelovanje kriterija. Ukoliko je sumarni vektor kriterija male apsolutne vrijednosti u odnosu na sumarni vektor drugog pojedinog kriterija, navedeno upućuje na

zaključak o konfliktnosti kriterija. Načelno se zaključuje da geometrijska prezentacija višekriterijske analize predstavlja vrlo snažan "alat" i značajnu pomoć kod problema koje karakteriziraju djelomično ili potpuno konfliktni kriteriji, što je nažalost sve prisutnije u procesima odlučivanja ([Mladineo 2009](#)).

### 3. REZULTATI DOBIVENI PROVEDENOM ANALIZOM

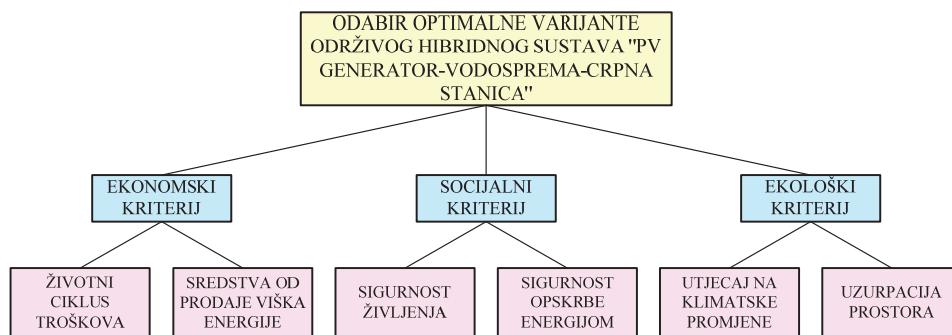
#### 3.1. Definiranje ulaznih parametara

Analizom održivosti hibridnog sustava PV generator-vodosprema-crpana stanica (Slika 1.) dobivene su veličine snage PV generatora  $P_{el}$ , veličina volumena vodospreme  $V$  te kapacitet crpne stanice  $Q_{PS}$  za različite dnevne periode bilanciranja  $t_b$  ([Durin i Margeta 2012](#)). Pri tome je izvršena jednokriterijska analiza na osnovu ekonomskih pokazatelja tj. veličine životnog ciklusa troškova  $LCC$ . Na osnovu prikazane analize dobiveno je pet varijanti (**Tablica 1**).

*Tablica 1. Veličine životnog ciklusa troškova LCC za svaku varijantu*

Redni broj varijante	Period bilanciranja $t_b$ [dani]	$LCC$ [€]
1	1	3573619
2	2	2826835
3	3	2841040
4	4	2939387
5	5	2930098

Iz **Tablice 1** vidljivo je da je na osnovi Ekonomskog kriterija varijanta broj 2 najprihvatljivija budući da je za nju iznos  $LCC$ -a najmanji u odnosu na preostale varijante. Međutim, analiza dobivenih varijanti rješenja iz ([Durin i Margeta 2012](#)) nije potpuna. Potrebno je uzeti u obzir i ekološke pokazatelje kao i socijalne pokazatelje kako bi sustavna održivost dobivenih varijanti rješenja bila zadovoljena. Vidljivo je da će biti potrebno primijeniti višekriterijske metode budući da će u ovom postupku biti potrebno definirati, a nakon toga usporediti i rangirati tri kriterija od kojih će svaki imati svoje podkriterije (**Slika 3**).



*Slika 3. Hjerarhijska struktura ciljeva*

Na slici 3. vidljivo je da su definirana tri glavna kriterija - Ekonomski, Socijalni i Ekološki kriterij, od kojih svaki ima po dva podkriterija. Ekonomski kriterij definiranje kvantitativno, dok su Socijalni i Ekološki kriteriji definirani kvalitativno. U nastavku će se detaljno prikazati opis svakog od navedenih podkriterija.

- Životni ciklus troškova (LCC)

Nastoji se da ovi troškovi budu što manji. Ovaj podkriterij opisan je kvantitativno preko veličine  $LCC$ -a u Eurima [€] za svaku varijantu (**Tablica 1**). U ovom slučaju koristit će se kriterij s linearnom preferencijom ("V" oblik funkcije preferencije  $p$ ), odnosno kriterij 3.

- Sredstva od prodaje viška energije

Nastoji se da ova veličina bude što veća. Ova sredstva su definirana na način da se razlika između snage PV generatora  $P_{el}$  i snage crpne stanice  $P_{PS}$  pomnoži sa prosječnim godišnjim brojem sati sijanja Sunca, a nakon toga i sa iznosom tarifne stavke od 2.1 kn/kWh ([Vlada Republike Hrvatske 2015](#)). U ovom slučaju koristit će se kriterij s linearnom preferencijom ("V" oblik funkcije preferencije  $p$ ), odnosno kriterij 3. Veličina sredstava od prodaje viška energije tijekom godine za svaku varijantu prikazana je u **Tablici 2**.

**Tablica 2.** Veličina sredstava od prodaje viška energije za svaku varijantu

Redni broj varijante	Sredstva od prodaje viška energije [€/god]
1	297802
2	203053
3	205838
4	212140
5	205691

Iz **Tablice 2** vidljivo je da je varijanta 1 najpovoljnija, dok je varijanta 2 najnepovoljnija.

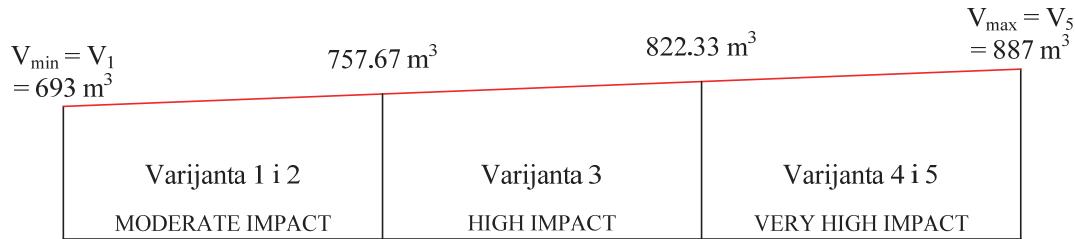
- Sigurnost življenja

Nastoji se da ova veličina bude što veća. Ovaj pod kriterij opisan je kvalitativno korištenjem veličine potrebnog volumena vodospreme  $V$  (**Tablica 3**), koji je, prema Đurin i Margeta (2012), najznačajniji čimbenik koji utječe na kontinuitet i sigurnost opskrbe vodom stanovništva. Što je volumen vodospreme  $V$  veći, to je sigurnost življenja veća.

**Tablica 3.** Veličina potrebnog volumena vodospreme  $V$  za svaku varijantu

Redni broj varijante	Potrebni volumen vodospreme $V$ [ $\text{m}^3$ ]
1	693
2	750
3	821
4	861
5	887

Iz **Tablice 3** vidljivo je da je varijanta 5 najpovoljnija, dok je varijanta 1 najnepovoljnija. U ovom slučaju koristiti će se kriterij razina, odnosno kriterij 4. Prikaz kvalitativnog opisa ovog kriterija vidljiv je na **Slici 4**.

**Slika 4.** Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina za sigurnost življenja

U svrhu što objektivnijeg definiranja kvalitativnog mjerila, napravljena je linearna podjela pojedine varijante u odnosu na najveći odnosno na najmanji potrebni volumen vodospreme  $V$ . Budući da svaki proračunati volumen vodospreme  $V$  osigurava kontinuitet i sigurnost opskrbe vodom, najniža kvalitativna ocjena je "moderate", dok je najviša ocjena "very high".

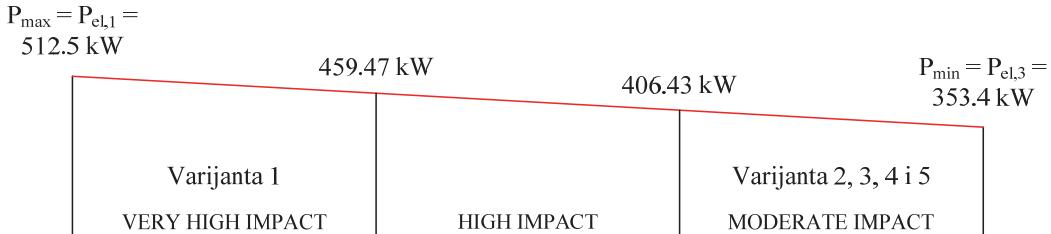
- Sigurnost opskrbe energijom

Ovaj kriterij opisan je kvalitativno korištenjem veličine potrebne snage PV generatora  $P_{el}$  (**Tablica 4**), Đurin i Margeta (2012). Što je potrebna snaga PV generatora veća, to je i sigurnost opskrbe energijom veća.

**Tablica 4.** Veličina potrebne snage PV generatora  $P_{el}$  za svaku varijantu

Redni broj varijante	Potrebna snaga PV generatora $P_{el}$ [kW]
1	512.5
2	361.6
3	353.4
4	363.5
5	355.7

Iz Tablice 4 vidljivo je da je varijanta 1 najpovoljnija, dok je varijanta 3 najnepovoljnija. U ovom slučaju koristit će se kriterij razina, odnosno kriterij 4. Prikaz kvalitativnog opisa ovog kriterija vidljiv je na Slici 5.



**Slika 5. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina za sigurnost opskrbe energijom**

U svrhu što objektivnijeg definiranja kvalitativnog mjerila, ovdje je također napravljena linearna podjela pojedine varijante u odnosu na najveću odnosno na najmanju potrebnu snagu PV generatora  $P_{el}$ . Budući da svaka proračunata snagu PV generatora  $P_{el}$  osigurava kontinuitet i sigurnost opskrbe vodom, najniža kvalitativna ocjena je "moderate", dok je najviša ocjena "very high".

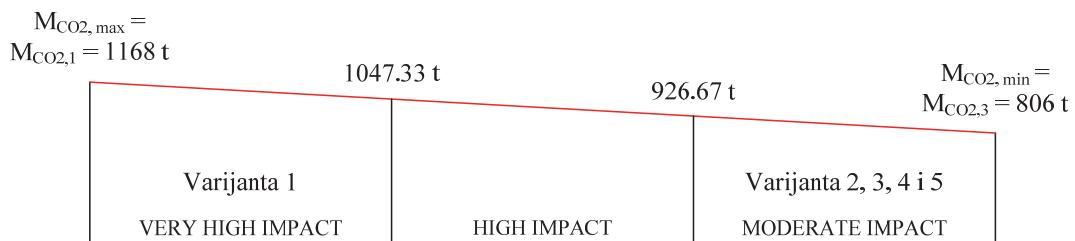
- Utjecaj na klimatske promjene

Ovaj kriterij opisan je kvalitativno korištenjem veličine ukupne mase ugljičnog dioksida  $M_{CO_2}$  (Glasnović & Margeta 2012) koja bi se smanjila u slučaju korištenja solarne fotonaponske (PV) energije u odnosu na klasičnu energiju (energiju iz konvencionalnih izvora). (Tablica 5), Đurin i Margeta (2012). Što je veličina ukupne mase ugljičnog dioksida  $M_{CO_2}$  (koja bi se smanjila u slučaju korištenja solarne fotonaponske (PV) energije u odnosu na klasičnu energiju) veća, to je utjecaj na klimatske promjene povoljniji (IPCC 2013). U ovom slučaju koristit će se kriterij razina, odnosno kriterij 4.

**Tablica 5. Veličina ukupne mase ugljičnog dioksida  $M_{CO_2}$  za svaku varijantu**

Redni broj varijante	Ukupna masa ugljičnog dioksida $M_{CO_2}$ [t]
1	1168
2	824
3	806
4	829
5	811

Iz Tablice 5 vidljivo je da je varijanta 1 najpovoljnija, dok je varijanta 3 najnepovoljnija. Prikaz kvalitativnog opisa ovog kriterija vidljiv je na slici 6.



**Slika 6. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina za utjecaj na klimatske promjene**

U svrhu što objektivnijeg definiranja kvalitativnog mjerila, ovdje je također napravljena linearna podjela pojedine varijante u odnosu na najveću odnosno na najmanju ukupnu masu ugljičnog dioksida  $M_{CO_2}$ , koja bi se smanjila u slučaju korištenja solarne fotonaponske (PV) energije u odnosu na klasičnu energiju. Najniža kvalitativna ocjena je "moderate", dok je najviša ocjena "very high".

- Uzurpacija prostora

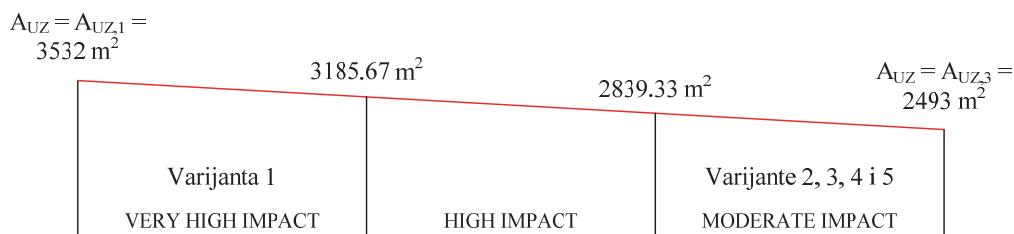
Ovaj kriterij opisan je kvalitativno korištenjem veličine tlocrne površine solarnih PV panela  $A_{PV}$  [ $m^2$ ] i tlocrne površine vodospreme  $A_V$  [ $m^2$ ], odnosno njihove ukupne sume  $A_{UZ}$  [ $m^2$ ]. Tlocrna površina crpne stanice zanemariva je u odnosu na tlocrne površine solarnih PV panela i vodospreme; okolne površine koje pripadaju solarnim PV panelima i vodospremi također nisu uzimane u obzir jer u konačnici također ne utječu na krajnji ishod analize. Ukupna površina solarnih panela  $A_{PV}$  dobivena je iz Đurin i Margeta (2012). Tlocrna površina vodospreme  $A_V$  također je dobivena iz Đurin i Margeta (2012) odnosno iz Tablice 3 na način da je volumen

vodospreme  $V$  podijeljen sa maksimalnom dubinom vode u vodospremi, koja u pravilu prema Margeta (2010) iznosi 6 m. Navedene veličine prikazane su u **Tablici 6**. Što je ukupna površina uzurpacije  $A_{UZ}$  veća, to je ekološki utjecaj od strane ovog podkriterija nepovoljniji. U ovom slučaju koristit će se kriterij razina, odnosno kriterij 4.

**Tablica 6. Veličine ukupne tlocrtne površine solarnih PV panela i vodospreme  $A_{UZ}$**

Redni broj varijante	Ukupna površina uzurpacije $A_{UZ} [m^2]$
1	3532
2	2536
3	2493
4	2567
5	2519

Iz **Tablice 6** vidljivo je da je varijanta 3 najpovoljnija, dok je varijanta 1 najnepovoljnija. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina vidljiv je na **Slici 7**.



**Slika 7. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina za uzurpaciju prostora**

### 3.2. Analiza rezultata dobivenih korištenjem programskog paketa Visual PROMETHEE 1.0

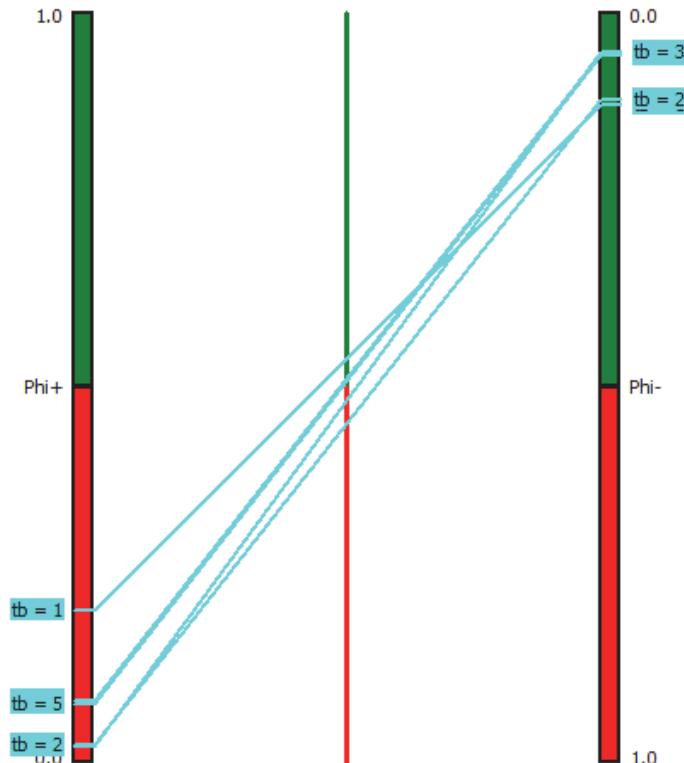
Ulagani podaci, kao i ostale veličine potrebne za provođenje višekriterijske analize prikazane su na **Slici 8**.

scenario1	Troškovi (LCC)	Sigurnost živ...	Utjecaj na kli...	Zarada sred...	Sigurnost op...	Uzurpacija p...
Unit	€	Utjecaj	Utjecaj	€	Utjecaj	Utjecaji
Cluster/Group	◆	■	●	◆	■	●
<b>Preferences</b>						
Min/Max	min	max	max	max	max	min
Weight	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Preference Fn.	V-shape	Level	Level	V-shape	Level	Level
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	1.00	0.50	n/a	1.00	0.50
- P: Preference	2826835	2.50	2.50	297802	2.50	1.00
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>Statistics</b>						
Minimum	2826835	3.00	3.00	203053	3.00	3.00
Maximum	3573619	5.00	5.00	297802	5.00	5.00
Average	3022196	4.00	3.40	224905	3.40	3.40
Standard Dev.	279424	0.89	0.80	36571	0.80	0.80
<b>Evaluations</b>						
tb = 1	3573619	moderate	very high	297802	very high	very high
tb = 2	2826835	moderate	moderate	203053	moderate	moderate
tb = 3	2841040	high	moderate	205838	moderate	moderate
tb = 4	2939387	very high	moderate	212140	moderate	moderate
tb = 5	2930098	very high	moderate	205691	moderate	moderate

**Slika 8. Prikaz ulaganih podataka i ostalih veličina potrebnih za provođenje višekriterijske analize**

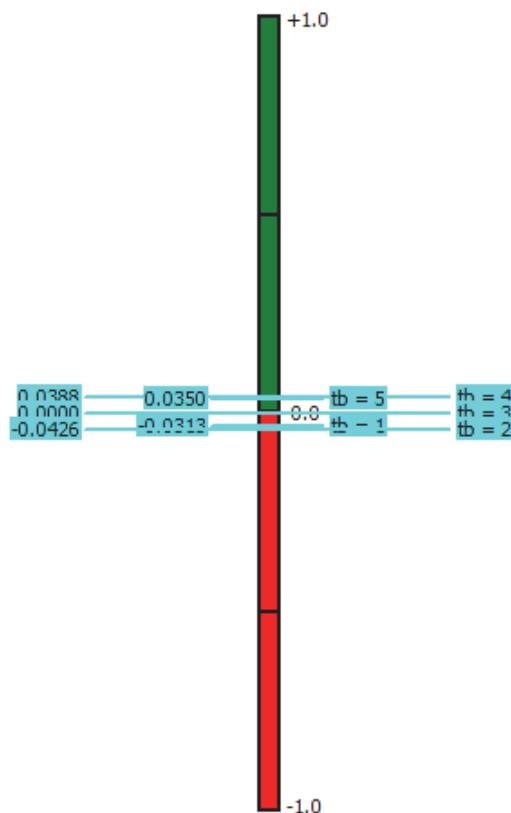
Kod Ekonomskog kriterija vrijednost parametra p postavljena je na poželjnu vrijednost s obzirom na svaku od pet varijanti. U ovom slučaju to je najniža vrijednost LCC-a (najniži troškovi) odnosno najviša vrijednost zarade od prodaje viška energije. Kod Socijalnog i Ekološkog kriterija vrijednost parametra q postavljena je na procijenjenu vrijednost koja se počinje uzimati u obzir, dok je vrijednost parametra p postavljena na poželjnu vrijednost koja se očekuje. Također su proračunati i prikazani statistički parametri (minimalna i maksimalna vrijednost, prosječna vrijednost te standardno odstupanje) za svaki kriterij odnosno za svaku varijantu. Crveno i zeleno naznačene vrijednosti predstavljaju ekstremne vrijednosti (najmanju i najveću vrijednost) ovisno od vrste preferencije koja se traži (minimum ili maksimum). Ponderi (težine) su postavljeni na vrijednost 1.00 u svrhu ujednačenosti kriterija odnosno u svrhu otklanjanja subjektivnosti ove analize.

Na **Slici 9** prikazan je dobiven redoslijed (rangiranje) svake varijante metodom PROMETHEE I.



**Slika 9. Dobiveni redoslijed (rangiranje) svake varijante metodom PROMETHEE I**

Lijevi stupac odgovara vrijednostima  $\Phi^+$ , desni stupac vrijednostima  $\Phi^-$ , dok srednji stupac odgovara vrijednostima  $\Phi$ . Prema (9) i (10) izvršeno je parcijalno rangiranje varijanti. Varijanta 4 nalazi se iznad svih varijanti odnosno dominira nad svim varijantama, što znači da je ona najbolje rangirana. Varijante 2 i 3, kao i varijante 4 i 5 rangirane su jedna uz drugu, što znači da se neznatno razlikuju jedna od druge. Varijanta 1 nije usporedljiva s ostalim varijantama i obratno jer se dužina koja spaja vrijednosti  $\Phi^+$  i  $\Phi^-$  za varijantu 1 sječe sa dužinama koje spajaju vrijednosti  $\Phi^+$  i  $\Phi^-$  za ostale varijante. S obzirom na vrijednosti  $\Phi^+$  i  $\Phi^-$  dobiven je vizualni prikaz koji nije najzorniji za analizu, stoga je uvid u vrijednosti  $\Phi^+$  i  $\Phi^-$  vidljiv iz Slike 10. Na **Slici 10** prikazan je dobiven redoslijed (rangiranje) svake varijante metodom PROMETHEE II. Gornji dio stupca odgovara vrijednostima  $\Phi^+$ , dok donji dio odgovara vrijednostima  $\Phi^-$ .



*Slika 10. Dobiveni redoslijed (rangiranje) svake varijante metodom PROMETHEE II*

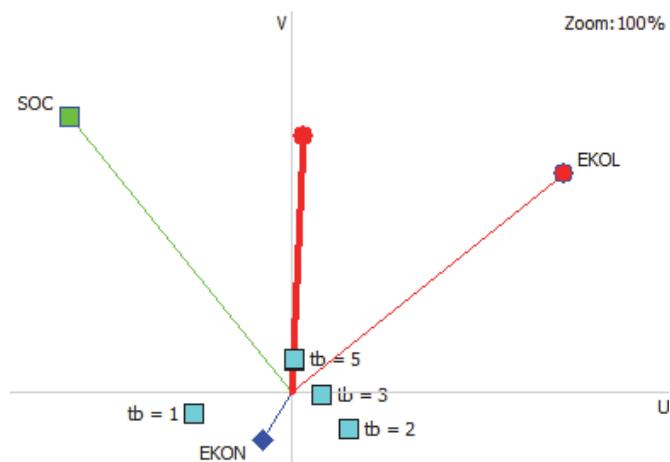
Prema (11) izvršeno je potpuno rangiranje varijanti, pri čemu je vidljivo da je varijanta 4 najbolje rangirana u odnosu na ostale varijante (ima najveću vrijednost veličine  $\Phi$ ), pri čemu ju slijede varijante 5, 3, 1 i 2. Varijanta 3 ima vrijednost veličine  $\Phi$  vrlo blizu nule, što znači da jeona prosječna varijanta po rangiranju. Iz **Slika 9 i 10** vidljivo je da metoda PROMETHEE I omogućava pojedinačnu usporedbu svake pojedine varijante sa ostalim varijantama. Time je ujedno omogućeno da donositelj procjene obrati pažnju na varijante koje su na osnovi (ne)usporedivosti problematične. Metoda PROMETHEE II to ne omogućava, no ona je lakša za analiziranje u odnosu na metodu PROMETHEE I.

Na **Slici 11** prikazana su rangiranja i pripadne vrijednosti  $\Phi^+$ ,  $\Phi^-$ , te  $\Phi$  za sve varijante.

	Action	$\Phi_i$	$\Phi_{i+}$	$\Phi_{i-}$
1	tb = 4	0.0388	0.0957	0.0569
2	tb = 5	0.0350	0.0933	0.0583
3	tb = 3	0.0000	0.0556	0.0556
4	tb = 1	-0.0313	0.2177	0.2490
5	tb = 2	-0.0426	0.0561	0.0986

*Slika 11. Rangiranja i pripadne vrijednosti  $\Phi^+$ ,  $\Phi^-$ , te  $\Phi$  za sve varijante.*

**Slika 11** je u stvari tablični prikaz rezultata dobivenih metodama PROMETHEE I i PROMETHEE II. Ovaj prikaz je prikidan i pregledan, naročito u slučaju velikog broja kriterija i varijanti. Rezultati analize dobiveni metodama PROMETHEE I i PROMETHEE II mogu se geometrijski prezentirati programom GAIA (**Slika 12**).



**Slika 12. Rezultati provedene analize geometrijski prezentirani metodom GAIA**

Sa **Slike 12** vidljivo je da su generirane tri dimenzije/komponente:

- $u$  je prva osnovna komponenta, koja sadrži najveću moguću količinu informacija;
- $v$  je druga osnovna komponenta, koja omogućava najviše dodatnih informacija okomito u odnosu na  $u$ ;
- $w$  je treća osnovna komponenta, koja omogućava najviše dodatnih informacija okomito na  $u$  i  $v$ .

Pojedine varijante označene su točkama (odносно analognim oznakama kao i u samom prikazu dobivenom u metodi PROMETHEE), kriteriji su označeni osima (odносно analognim oznakama kao i u samom prikazu dobivenom u metodi PROMETHEE), dok su ponderi (težine) označene osima odluke (komponentama  $u$ ,  $v$  i  $w$ ). Najveća moguća količina informacija označena je u donjem desnom uglu i iznosi 100 %, što znači da se u ovoj analizi provedenoj programom GAIA obuhvaćen maksimum mogućih informacija. Vektor odluke naznačen je debelom crvenom linijom sa ispunjenim krugom. Rangiranje pojedine varijante definira se na način da se na vektor odluke povuče okomica iz točke koja definira pojedinu varijantu. Što je pojedina varijanta bliže u odnosu na smjer kojega definira vrh vektora odluke, to je ona bolje rangirana. Sa **Slike 12** vidljivo je da je varijanta 4 najbolje rangirana, slijedi ju varijanta 5, 3, 1 i 2. Varijante 4 i 5 se poklapaju, no na osnovi analize metodom PROMETHEE vidljivo je da je varijanta 4 najbolje rangirana. Varijante koje su slične nalaze su bliže jedna drugoj i obratno. Kod kriterija koji su slični jedan drugome, osi su im usmjerene u istom smjeru (u ovom slučaju nema takvih osi tj. nema takvih kriterija) i obratno. Kriteriji koji su izrazito kontradiktorni jedan drugome nalaze se u suprotnim smjerovima (također u ovom slučaju nema takvih kriterija). Duljina osi pojedinog kriterija izražava značajnost ("jačinu") pojedinog kriterija; što je dulja os, kriterij je značajniji. Navedeno ukazuje na kriterije na koje je potrebno obratiti pažnju. U ovom slučaju vidljivo je da su Socijalni i Ekološki kriterij dominantni u odnosu na Ekonomski kriterij, stoga bi eventualno trebalo smanjiti težine (pondere) Socijalnog i Ekološkog kriterija, odnosno povećati težine (pondere) Ekonomskog kriterija. Navedena odluka ovisi o cilju i namjeni višekriterijske analize, o preferenciji donositelja odluke kao i o mogućim scenarijima koji se razmatraju.

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu napravljena je višekriterijska analiza pet različitih varijanti za pet različitih perioda bilanciranja  $t_b$  ( $t_b = 1, 2, 3, 4$  i  $5$  dana) korištenjem višekriterijskih metoda u svrhu odabira optimalne varijante vodoopskrbnog sustava pokretanog solarnom fotonaponskom (PV) energijom. Rezultati dobiveni ovom analizom pokazali su da je varijanta 4 optimalna, odnosno najbolje rangirana. Slijede ju varijante 5, 3, 1 i u konačnici varijanta 2 kao najslabije rangirana. Vidljivo je da se optimalni rezultat višekriterijske analize (u ovom slučaju varijanta 4) ne poklapa sa optimalnim rezultatom dobivenim jednokriterijskom analizom odnosno rangiranjem na osnovi samo Ekonomskog kriterija tj. veličine životnog ciklusa troškova LCC-a, gdje je varijanta 2 optimalna. Dobiveni rezultati pokazuju da višekriterijska analiza upotpunjuje jednokriterijsku analizu. Također je i u drugim slučajevima moguće da višekriterijska analiza potvrdi ili odbaci rezultate dobivene jednokriterijskom analizom. Na osnovu ove analize, vidljivo je da se inženjerska problematika mora sagledati sa šireg stajališta. Drugim riječima, uz jednokriterijsku analizu troškova (finansijsku tj. ekonomsku analizu) potrebno je problem analizirati i sa strane drugih kriterija (stajališta). U ovom primjeru jednokriterijska analiza dopunjena je sa analizom Socijalnog i Ekološkog kriterija (stajališta). Naročitu pažnju potrebno je obratiti na definiranje težina (pondera) te u raspon i način vrednovanja pojedinog kriterija, što se kasnije odražava i na vrednovanje pojedine varijante. Višekriterijska analiza napravljena je korištenjem višekriterijske metode PROMETHEE (PROMETHEE I i PROMETHEE II), pri čemu je korišten programski paket Visual PROMETHEE 1.0. Dobiveni rezultati prikazani su grafički, što ovaj programski paket čini vrlo prihvatljivim za korištenje, prikaz i analizu dobivenih rezultata. Za izradu ovog rada nisu korištene sve mogućnosti programskog

paketa Visual PROMETHEE, budućida njihovo korištenje prelazi njegovu veličinu i namjenu. U dogledno vrijeme očekuju se i nove nadogradnje mogućnosti i opcija spomenutog programskog paketa. Za očekivati je da će preostale mogućnosti programskog paketa Visual PROMETHEE 1.0, kao i proširenja kriterija odnosno dopune i proširenja same višekriterijske analize biti korištene u dalnjim znanstvenim istraživanjima, Navedena znanja i spoznaje uvelike će doprinositi rješavanju i razumijevanju problematike održivih gradova odnosno problematike korištenja obnovljivih izvora energije ("Green energy").

## 6. LITERATURA

- Andreopoulou, Z., Koliouska, C., Galariotis, E., Zopounidis, C., 2017. Renewable energy sources: Using PROMETHEE II for ranking websites to support market opportunities. *Technological Forecasting and Social Change*. 131, 31-37.
- Brans J.P., Vincke Ph., Mareschal B. (1986). How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method, *European Journal of Operations Research*, 24(2):228-238.
- Cavallaro, F. (2013). Assessment and Simulation Tools for Sustainable Energy Systems: Theory and applications, Springer-Verlag, London, Velika Britanija.
- Department for Communities and Local Government. (2009). Multi-criteria analysis: a manual, Communities and Local Government Publications, Wetherby, Velika Britanija.
- Đurin B., Margita J. (2012). Concept of green energy supply for urban water system, *Zbornik radova "International Conference on Green Technology & Ecosystems for Global Sustainable Development 2012 (ICGTEC 2012)"*, Tuzla, Bosna i Hercegovina.
- 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*, 75, 780-795.
- Escudero-Pascual, A., (2005). Sizing of standalone PV systems based on the "worst month" method, u: *Manual de Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación al Desarrollo*, 1998. Engineering without Borders, Madrid, Španjolska.
- Glasnović Z., Margita J. (2011). Vision of total renewable electricity scenario, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4): 1873-1884.
- Hamidat, A., Benyoucef, B., (2009). Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage. *Energy Policy*, 37(4), 1489-1501.
- IPCC. (2013). *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2013 (AR4)*, Ženeva, Švicarska.
- Kolios, A., Mytilinou, V., Lozano-Minguez, E., Salonitis, K. (2016). A Comparative Study of Multiple-Criteria Decision-Making Methods under Stochastic Inputs, *Energies*, 9, 566.
- Lai E., Lundie S., Ashbolt N.J. (2008). Review of multi-criteria decision-aid for integrated sustainability assessment of urban water systems, *Urban Water Journal*, 5(4):315-327.
- Mareschal B. 2012. Visual PROMETHEE 1.0 Manual, Brisel, Belgija.
- Margita, J. (2010). *Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode*, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska.
- Mladineo, N. (2009). Podrška izvođenju i odlučivanju u graditeljstvu (manuskript za internu uporabu), Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska.
- Roy B. (1996). Multicriteria methodology for decision aiding. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Nizozemska.
- Vlada Republike Hrvatske. (2015). Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, Zagreb, Hrvatska.



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



GEOTEHNIČKI FAKULTET  
Zavod za hidrotehniku  
Laboratorij za geokemijsku okoliš  
tel.: 042 / 408 - 937  
fax: 042 / 313 - 587



## LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

- osnovan je 2006. godine sa znanstvenom, stručnom i obrazovnom svrhom
- opremljen instrumentima i pratećom opremom za prikupljanje uzoraka tala, sedimenta, prirodnih i otpadnih voda
- vrši terenske i laboratorijske analize prikupljenih uzoraka
- obavlja usluge agrokemijskih analiza tla za poljoprivrednike na temelju kojih se daje preporuka za gnojidbu

Zavod za hidrotehniku



## LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

Tel.: 042 / 408 - 937

Fax: 042 / 313 - 587

E-mail: lgo@gfv.hr

## LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

Laboratorij za geokemijsku okolišu osnovan je u sklopu Zavoda za hidrotehniku Geotehničkog fakulteta u Varaždinu. Laboratorij sudjeluje u izvođenju praktične nastave iz kolegija preddiplomskog i diplomskog studija te Združenog međunarodnog doktorskog studija kao i u znanstvenim te stručnim projektima. Na taj način ispunjava svoju obrazovnu, znanstvenu i stručnu svrhu. Smješten je na 100 m<sup>2</sup> prostora i opremljen modernom opremom za provedbu geokemijskih terenskih i laboratorijskih ispitivanja, što uključuje prikupljanje uzoraka tla, sedimenta i vode. U laboratoriju se obavljaju i usluge agrokemijskih analiza tla.

### Pokazatelji koje mjerimo u uzorcima voda, eluata tala i sedimenta:

- ~ atomskom apsorpcijskom spektrometrijom: Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Se, Si, Sr, Ti, V, Zn
- ~ amonijak, nitriti, nitrati, ukupni dušik
- ~ bromidi, fenoli, fluoridi, fosfati, jodidi, kloridi
- ~ silikati, sulfidi, sulfati, sulfiti
- ~ suspendirana tvar, mутnoća, KPK
- ~ alkalitet, ukupna tvrdoća, karbonatna tvrdoća, nekarbonatna tvrdoća, kalcijeva tvrdoća, magnezijeva tvrdoća
- ~ slobodni CO<sub>2</sub>, koncentracija otopljenog kisika i zasićenost kisikom
- ~ pH, električna vodljivost, ukupna otopljenja tvar – TDS
- ~ trasiranje podzemnih tokova (koncentracija natrijevog fluoresceina)
- ~ ukupni organski ugljik i ukupni dušik – TOC/DOC/TN
- ~ razaranje tla zlatotopkom
- ~ ekstrakcija izmjenjivih kationa iz tla amonijevim acetatom i kalijevim kloridom



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

Ispitivanje fizikalnih i kemijskih svojstava prirodnih i otpadnih voda.



Ispitivanje sastava eluata otpada.



Određivanje pH, pKCl, ukupnog CaCO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, fosfora i kalija, humusa, teških metala i drugih kemijskih svojstava tla.

**Kontakti:** doc.dr.sc. Anita Pticek Siročić  
voditeljica laboratorija  
tel: 042 / 408 - 957  
e-mail: anita.pticek.sirocic@gfv.hr

Dragana Dogančić, dipl.ing.geol.  
zamjenica voditeljice laboratorija  
tel: 042 / 408 - 956 ili 042 / 408 - 937  
e-mail: ddogan@gfv.hr

Saša Zavrtnik, dr.med.vet.  
laborant  
tel: 042 / 408 - 937  
e-mail: lgo@gfv.hr

# SATELITSKA MISIJA COPERNICUS – MOGUĆNOSTI NADZIRANJA PRIRODNIH NEPOGODA

## SATELLITE MISSION COPERNICUS – POSSIBILITY OF NATURAL HAZARD MONITORING

**Lucija Jakopović<sup>1</sup>, Miljenka Kolarek<sup>1</sup>, Milan Rezo<sup>1</sup>, Nikola Kranjčić<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Republika Hrvatska

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

**Sažetak:** Razvitkom prvih satelitskih snimaka ljudi razmatraju mogućnosti kako te snimke upotrijebiti u praćenju prirodnih nepogoda, njihovom predviđanju i mogućnostima izbjegavanja takvih nepogoda pravovremenim reakcijama. Dugi niz godina prepreku navedenom predstavljalio je ograničenje u rezoluciji tih snimaka. Europska svemirska agencija razvija satelitske misije Sentinel, čiji sateliti predstavljaju značajan napredak u poboljšanju prostorne rezolucije. U ovom radu napravljen je pregled satelitskih misija i mogućnosti njihovih primjena u nadziranju prirodnih nepogoda. Prirodne nepogode koje se u radu navode su šumske požari, te oštećenost šuma potkornjakom.

**Ključne riječi:** satelitska misija Copernicus, Sentinel misije, prirodne nepogode, oštećenost šuma potkornjakom, šumske požare

**Abstract:** Since the development of satellite imagery, people are considering the possibilities of using these recordings in the monitoring of natural disasters, their prediction, and the possibility of avoiding such disasters in timely reactions. For many years the obstacle was a limitation in the resolution of those images. The European Space Agency is developing a satellite mission Sentinel, whose satellites represent significant advances in improving spatial resolution. In this paper an overview of satellite missions and the application possibilities in monitoring natural disasters has been made. Natural disasters presented in this paper are forest fires and bark beetle damaged forests.

**Keywords:** satellite mission Copernicus, Sentinel missions, natural disaster, bark beetle forest damage, forest fires

Received: 17.07.2018. / Accepted: 03.09.2018.

Published online: 17.12.2018.

Pregledni rad / Review paper

### 1. UVOD

Copernicus program Europske unije je najopsežniji dosad pokrenuti program opažanja i praćenja Zemlje i stanja njenog okoliša. Zahvaljujući većoj dostupnosti podataka korisnicima, očekuje se znatan doprinos razvoju gospodarskih područja. Glavne institucije odgovorne za razvoj Copernicus programa su Europska svemirska agencija (European Space Agency, ESA) i Europska agencija za okoliš (European Environment Agency, EEA) ([Europska agencija za okoliš 2018](#)).

Copernicus program je nastavak Global Monitoring for Environment and Security (GMES) programa, čiji razvoj je počeo 1998. godine. GMES program je 2012. godine promijenio ime u Copernicus program ([Europska komisija 2012](#)). Međutim, Copernicus program je također i rezultat iskustva istraživanja i razvoja europskih i nacionalnih institucija u nekoliko proteklih desetljeća. Osnovni motiv pokretanja programa Copernicus je razvoj praćenja okoliša i poboljšanje ukupne sigurnosti Europske Unije. Copernicus programom se između ostalog žele dobiti dugoročni kontinuirani servisi koji bi omogućili drugačije upravljanje prostorom ([Portal za opažanje Zemlje 2018](#)).

U globalnom kontekstu, Copernicus je integralni dio sustava Global Earth Observation System of Systems (GEOSS).

### 2. COPERNICUS PROGRAM

Europski Copernicus program za opažanje Zemlje jedan je od najvećih programa Europske komisije čiji je cilj davanje poboljšanih informacija o Zemlji. Copernicus servisi pokrivaju šest tematskih područja: zemlju, more, atmosferu, promjenu klime, upravljanje hitnim intervencijama i sigurnost. Podržavaju širok raspon primjena uključujući zaštitu okoliša, upravljanje urbanim područjima, regionalno i lokalno planiranje, poljoprivredu, šumarstvo, ribarstvo, zdravstvo, transport, promjenu klime, održivi razvoj i druge. Primarni Copernicus servisi će davati potrebne informacije za donošenje odluka o okolišu i donošenju odluka u slučaju izvanrednih situacija kao što su prirodne katastrofe i humanitarne krize. Copernicus program koordinira i njime upravlja Europska komisija.

Europska svemirska agencija je nadležna za satelitske sustave, a Europska agencija za okoliš za in-situ komponentu. Copernicus će doprinijeti Europskoj strategiji održivog razvoja, podržavajući odluke koje se moraju donijeti za vrijeme izvanrednih situacija kao što su poplave i humanitarne krize.

Gospodarstvo i građani će imati korist kroz inovacije i poticaje za stvaranje novih praktičnih primjena proizvoda i usluga. Najveći doprinos građanstvu očitovati će se u pravovremenom sprječavanju prirodnih nepogoda što će direktno utjecati na sprječavanje materijalnih šteta čime se doprinosi uštedi sredstava. Raznovrsnost, brzina i kvaliteta prikupljanja podataka doprinijeti će konkurentnosti gospodarstva razvijanjem novih tvrtki koje će nuditi analize Copernicus proizvoda. Copernicus je do sada najopsežniji program opažanja Zemlje pa bi samim time znanstveni i društveno-ekonomski napredak trebao biti značajan (Martinić 2015; SpaceTec partners 2012; Specific Contract under the Framework Service Contract 89/PP/ENT/2011 – LOT 3. SpaceTec partners 2013).

Izvori podataka za Copernicus program općenito se mogu podijeliti na podatke satelitskih misija i podatke in-situ senzora.

Copernicus informacijski servisi temelje se na podacima dobivenim iz konstellacije obitelji 6 satelita, poznatim pod imenom „Sentinel“ i desetima sporednih satelita koji su poznati pod nazivom „misije koje doprinose“ (engl. Contributing Missions, CM). Copernicus program predstavlja autentično europsko zajedničko nastojanje za praćenje Zemlje.

Dvije su osnovne komponente Copernicus programa:

- Svemirska komponenta
- Copernicus servisi.

## 2.1. Svemirska komponenta

Svemirsku komponentu Copernicus programa podržava Europska svemirska agencija (ESA) i upravlja satelitskim misijama koje sudjeluju u razvitku ovog programa i prikupljanju Earth-Observation (EO) podataka koji predstavljaju temelj programa. Sentinel misije su posebno razvijane misije čija je primarna uloga dobivanje podataka za razvijanje Copernicus servisa. Premda se mnogo sredstava ulaže upravo u ove misije, čiji je osnovni cilj razvoj Copernicus programa, da bi ovaj program bio učinkovitiji što većem broju korisnika, potrebna je suradnja između više strana da bi krajnji proizvod bio bolji. Tako, osim Sentinel misija, Copernicus program koristi proizvode velikog broja drugih misija. Misije koje doprinose (CM) uključuju misije Europske svemirske agencije, misije zemalja članica EU i misije trećih strana. Misije trećih strana ESA koristi za razvoj Copernicus programa, ali se podaci distribuiraju pod određenim specifičnim uvjetima koji se ugovaraju s vlasnicima ili operatorima takvih misija, a pri tome se poštuje ESA-ina politika o podacima.

### 2.1.1. Sentinel misije

Svaka Sentinel misija (SM) zasnovana je na konstellaciji od dva satelita da bi bio ispunjen zahtjev pokrivenosti satelitima. U Sentinel misije su ugrađene različite tehnologije poput instrumenata za snimanje radarskih i multispektralnih snimaka za praćenje Zemljine površine, oceana i atmosfere.

Sentinel-1 je misija postavljena u polarnoj orbiti koja služi servisima povezanim s praćenjem kopna i oceana neovisno o vremenskim uvjetima ili dobu dana. Prvi Sentinel satelit, Sentinel-1A, lansiran je 3. travnja 2014. a Sentinel-1B 25. travnja 2016. godine ([Službena web stranica Sentinel misija 2018; Copernicus overview 2018](#)).

Sentinel-2 je polarno orbitalna multispektralna misija snimanja visoke rezolucije za praćenje zemljišta i daje snimke vegetacije, pokrova tla i vode, unutarnjih vodenih tokova i obalnih područja. Sentinel-2 također dostavlja informacije za servise hitnih slučajeva. Sentinel-2A lansiran je 23. lipnja 2015., a Sentinel-2B 7. ožujka 2017. godine ([Službena web stranica Sentinel misija 2018; Copernicus overview 2018](#)).

Sentinel-3 je multi-instrumentalna misija uspostavljena za mjerjenja površine mora, temperature površine mora i zemlje, boje oceana i zemlje s visokom točnosti i pouzdanosti. Misija će podržavati sustave za oceanske prognoze i praćenje okoliša i klime. Sentinel-3A je lansiran 16. veljače 2016.

Sentinel-4 posvećen je atmosferskom praćenju, a bit će postavljen na Meteosat Third Generation-Sounder (MTG-S) satelit u geostacionarnoj orbiti ([Službena web stranica Sentinel misija 2018; Copernicus overview 2018](#)).

Sentinel-5 također služi za praćenje atmosfere iz polarne orbite pomoću MetOp Second Generation satelita. Sentinel-5 Precursor je satelitska misija posvećena atmosferskom praćenju koja se razvija kako bi se smanjile rupe u podacima između Envisata ([Službena web stranica Sentinel misija 2018; Copernicus overview 2018](#)).

Sentinel-6 nosi altimetarski radar za mjerjenje visine razine mora, primarno za oceanografiju i studije o klimi.

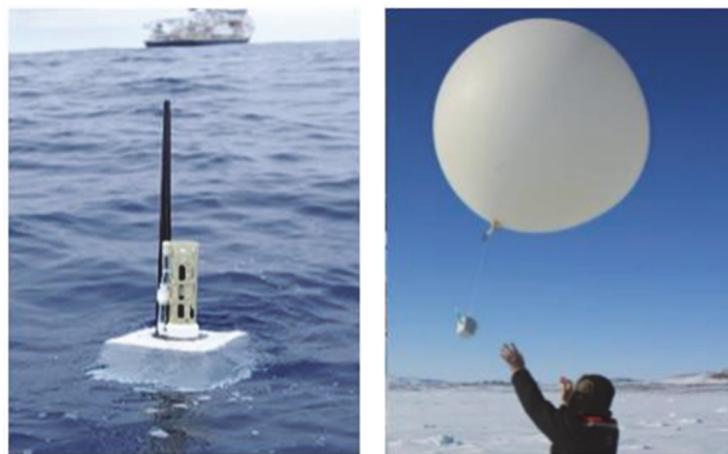
Svim Sentinel misijama i satelitima na kojima se zasniva Copernicus program, upravlja Europska svemirska agencija. Za održavanje infrastrukture svemirske komponente programa je osim ESA-e zadužen i EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites). Djelovanje vezano za Sentinele povjerenje je ESA-i i EUMETSAT-u, zbog specifičnih vještina koje te dvije organizacije posjeduju, a sateliti Sentinel misije (SM) vlasništvo su Europske Unije ([Sentinel Scientific Data Hub 2018](#)).

### 2.1.2. In-situ mjerena

Satelitske misije ponekad su dovoljan izvor podataka, no vrlo često ih je potrebno dopuniti in-situ mjerjenjima da bi dali doprinos ovom programu. In-situ mreže za praćenje sastoje se od različitih senzora postavljenih na kopnu, u moru ili zraku, te prikupljaju podatke o okolišu na koje se oslanjaju Copernicus servisi. Mreže su georeferencirane, a prikupljaju i pomoćne podatke čija je svrha kalibracija i provjera satelitskih podataka. In-situ infrastruktura za praćenje je široko razvijena i uključuje senzore postavljene na obalama rijeka, senzore na letjelicama te senzore smještene na brodove ili u bove. Dio in-situ infrastrukture čine i bespilotne letjelice, a sudjeluju i znanstvenici sa svojim podacima, koje su prikupili klasičnim mjerjenjima.. Program pohranjuje podatke registrirane senzorima i daje velik broj pouzdanih i ažuriranih informacija o stanju planeta Zemlje. Podaci i informacije se koriste za statističke analize, topografske mape iz kojih se iščitavaju indikatori za modeliranje prošlih, sadašnjih i budućih trendova. Sve to uvelike doprinosi, obogaćuje i poboljšava Copernicus servise, ali i svemirsku komponentu te njihovu točnost i pouzdanost. U **Tablici 1** su prikazani primjeri in-situ podataka koje zatim koriste Copernicus servisi, a na **Slici 1** su prikazana dva različita in-situ mjerena ([Copernicus sateliti 2018](#)).

**Tablica 1. Primjeri in-situ mjerena, (In-situ opažanja 2018)**

Meteorologija	Meteorološke stanice koje mjere temperaturu, količinu oborina, vlažnost, vjetar, UV sunčeve zračenje Atmosferski profili: temperatura, vjetar, vlažnost
Klima	Povjesni podaci
Oceanografija	Fizikalni parametri: temperatura, salinitet, oceanske struje, visina površine mora, led, dubina Biološki parametri: klorofil, otopljeni kisik, nutrijenti i mikro nutrijenti npr. željezo, produkcija zooplanktona
Atmosferski sastav	Koncentracija najvećih zagadivača zraka (NOx, PM10, PM2.5, CO, SO <sub>2</sub> , HCHO, Pb, TSP, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) Kemijski sastav aerosola Koncentracija plinova (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> i N <sub>2</sub> O)
Sastav i korištenje zemlje	Mjerenje protoka vode u riječnim tokovima, korištenje vode, podzemne vode, jezera, pokrivenost snijegom, ledene kape i glacijari, ledeni pokrovi, pokrov zemljista, apsorbirana fotosintetska aktivna radijacija, indeks površine lista, biomasa na tlu, ugljik u tlu, vlažnost tla



**Slika 1. In-situ mjerena (In-situ opažanja 2018)**

### 2.2. Copernicus servisi

Komponenta Copernicus programa koja koristi podatke dobivene Sentinel satelitskim misijama i nadopunjuje ih in-situ mjerjenjima su Copernicus servisi. Njihova namjena je davanje usluga za upravljanje i zaštitu okoliša, upravljanje prirodnim resursima. Copernicus servisi pružaju informacije za šest glavnih područja: praćenje kopna, praćenje mora i oceana i praćenje atmosfere, hitne intervencije, sigurnost i klimatske promjene. Ovu komponentu načelno nadgleda Uprava Europske komisije. U rad Copernicus servisa uključene su i neke druge europske agencije poput European Environment Agency (EEA), European Agency for the Management of Operational Cooperation at the External Borders of the Member States of the European Union (FRONTEX), European Satellite Centre ([Copernicus 2018; Vrgoč 2017](#)).

Sastoji se od 6 servisa:

1. Servis za praćenje atmosfere (Copernicus Atmosphere Monitoring Service – CAMS)
2. Servis za praćenje mora i pomorja (Copernicus Maritime Monitoring Service – CMMS)
3. Servis za praćenje zemljista (Copernicus Land Monitoring Service – CLMS)
4. Servis za praćenje klimatskih promjena (Copernicus Climate Change Service – C3S)

5. Servis za upravljanje kriznim situacijama (Copernicus Emergency Management Service – CEMS)
6. Servis za sigurnost (Copernicus Security Service - CSS), ([Copernicus 2018](#)).

### 2.2.1. Servis za praćenje atmosfere (CAMS)

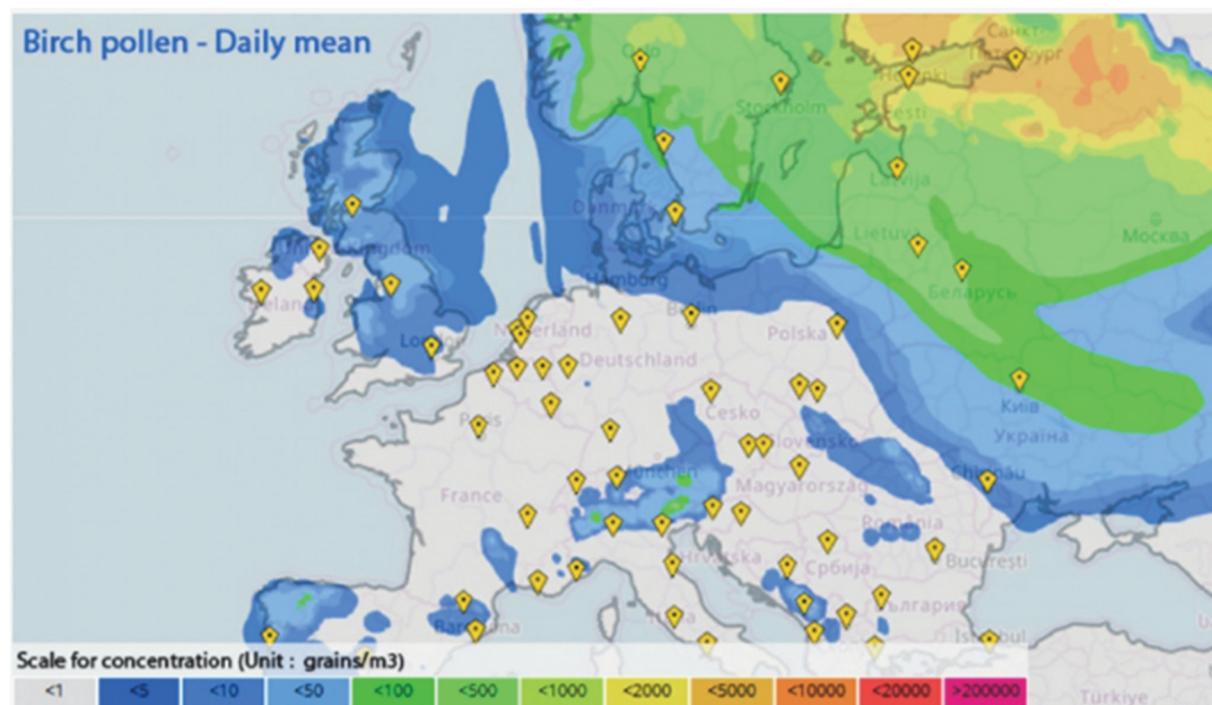
Servis za praćenje atmosfere pruža kontinuirane podatke i informacije o atmosferskom sastavu. Usluga opisuje trenutačnu situaciju, prognozira situaciju nekoliko dana unaprijed i analizira dosljedno retrospektivne podatke o posljednjim godinama. Servis podržava brojne primjene u raznim domenama uključujući: zdravstvo, praćenje okoliša, energija iz obnovljivih izvora, meteorologiju, klimatologiju.

Glavna područja CAMS-a su:

- Kvaliteta zraka i sastav atmosfere
- Sloj ozona i UV zračenje
- Emisija i razdioba CO<sub>2</sub>
- Solarno zračenje
- Klimatski faktor.

Servis pruža dnevne informacije o globalnom atmosferskom sastavu praćenjem i predviđanjem sastojaka kao što su staklenički plinovi (ugljični dioksid i metan), reaktivni plinovi (npr. ugljični monoksid, oksidirani dušikovi spojevi, sumporni dioksid), ozon i aerosoli. Pruža analize u realnom vremenu i četvero-dnevne prognoze, kao i reanalizu europske kakvoće zraka, čime se omogućuje stalna procjena zraka koji dišemo.

Obuhvaća javne i privatne organizacije uključene u korištenje solarne energije s odgovarajućim i točnim informacijama o količini sunčevog zračenja na površini Zemlje, što je od velike važnosti u područjima poput zdravstva, poljoprivrede i obnovljivih izvora energije. Na **Slici 2** je prikazan jedan od proizvoda ovog servisa: rasprostranjenost koncentracije peludi ([Copernicus 2018](#); [Vrgoč 2017](#)).



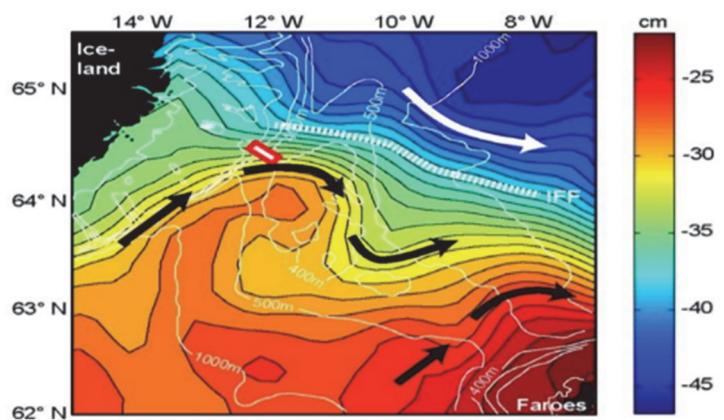
*Slika 2. Koncentracija peludi (izradio CAMS), ([Copernicus 2018](#))*

### 2.2.2. Servis za praćenje mora i pomorja (CMMS)

Servis za praćenje mora i pomorja pruža informacije o fizičkom stanju, varijabilnosti i dinamici oceana i morskih ekosustava za globalni ocean i europski regionalni morski ocean. Taj servis je povezan s politikom EU u poljima poput (po)morske sigurnosti, morskog i obalnog okoliša, morskih resursa i vremenske prognoze. Servis obrađuje i dostavlja podatke o strujama, temperaturi, vjetru čime se doprinosi sigurnosti na moru. Fizičke i morske biogeokemijske komponente korisne su za praćenje kakvoće vode i kontrolu onečišćenja.

Mnogi podaci koje servis isporučuje (npr. temperatura, slanost, razina mora, struje, vjetar i debljina leda) također imaju ključnu ulogu u domeni vremenskih, klimatskih i sezonskih predviđanja. Njihova uloga navedena je u primjerima: povišenje razine mora pomaže u procjeni obalne erozije, temperatura površine mora je jedan od primarnih fizičkih utjecaja na klimatske promjene i ima izravne posljedice na morske ekosustave. Na **Slici 3** je prikazan jedan od konačnih rezultata servisa: promjena razine mora na nekom području. Bijele linije povezuju

mjesta s istom srednjom razinom mora čiji je raspon prikazan određenom bojom. Strelice pokazuju smjer kretanja morskih struja (Copernicus 2018; Vrgoč 2017).



Slika 3. Kretanje morskih struja, (Copernicus 2018)

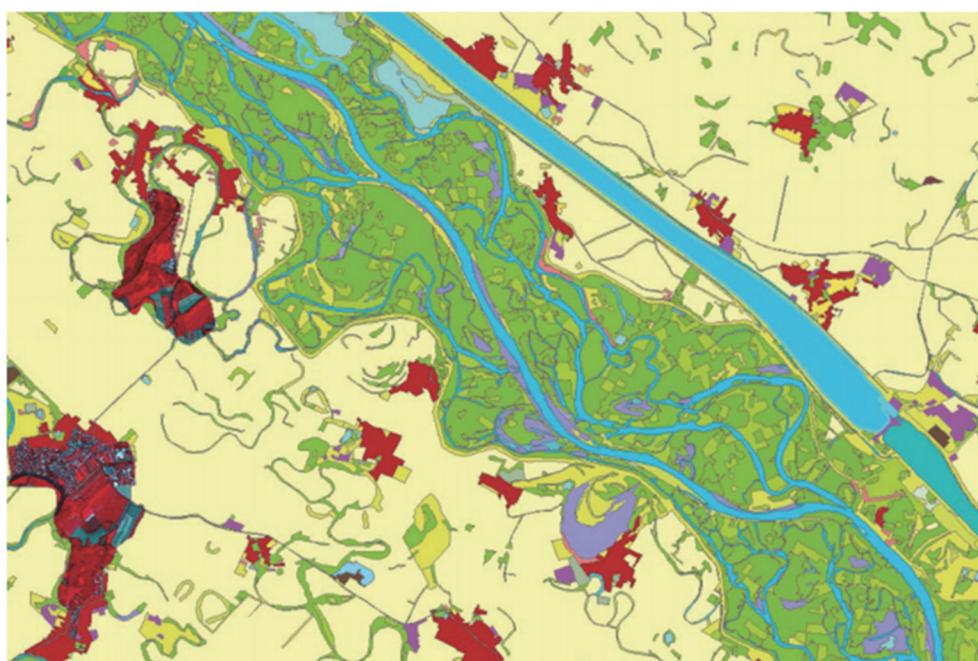
### 2.2.3. Servis za praćenje zemljišta (CLMS)

CLMS pruža zemljopisne informacije o kopnenom pokrovu i varijablama koje se odnose na primjer na informacije o pokrovu zemljišta, odnosno o korištenju zemljišta i promjeni korištenja zemljišta. Servis podržava aplikacije na različitim područjima kao što su: prostorno planiranje, upravljanje šumama, upravljanje vodama, poljoprivreda.

CLMS se sastoji od 3 glavne komponente:

- Globalna komponenta
- Pan-europska komponenta
- Lokalna komponenta.

Globalna komponenta osigurava podatke širokog raspona biofizičkih varijabli na globalnoj razini. Podaci opisuju stanje vegetacije (npr. indeks stana vegetacije), energetski proračun (npr. temperatura zemljine površine). Pan-europska komponenta opisuje glavne vrste kopnenih površina: umjetne površine (npr. ceste i popločana područja), šumske površine, poljoprivredna područja (travnjaci), močvare i mala vodna tijela. Lokalna komponenta nastoji pružiti specifične i detaljnije informacije koje nadopunjaju informacije dobivenima paneuropskom komponentom. Obuhvaća kopneno zemljište i informacije o korištenim zemljištima. Na Slici 4 je prikazana karta koja prikazuje zemljište. Zelenom bojom je prikazana vegetacija, plavom voda (potok), a crvenom urbana i naseljena područja (Copernicus 2018).



Slika 4. CLMS- ova karta zemljišta, (Copernicus 2018)

## 2.2.4. Servis za praćenje klimatskih promjena (C3S)

Servis za praćenje klimatskih promjena zamišljen je kao reakcija na ekološke i društvene izazove povezane s klimatskim promjenama. U studenom 2014. Europska komisija je potpisala Sporazum o delegaciji s Europskim centrom srednjih vremenskih prognoza (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) za provedbu ove usluge pa će servis postati operativan krajem 2018. godine. Usluga će omogućiti pristup k nekoliko klimatskih pokazatelja (npr. povećanje temperature, porast razine mora, topljenje ledenog sloja, zagrijavanje oceana) i klimatskih indeksa (npr. na temelju zapisa o temperaturi, oborinama i sušnim događajima) te će prikazivati očekivane klimatske utjecaje.

Temelj servisa i njegovih usluga su četiri stupa:

- Arhiva podataka o klimi
- Sektorski informacijski sustav koji pruža prilagođene informacije krajnjim korisnicima
- Evaluacija i kontrola kvalitete informacija
- Aktivnosti na području informiranja i širenja informacija ([Copernicus 2018](#)).

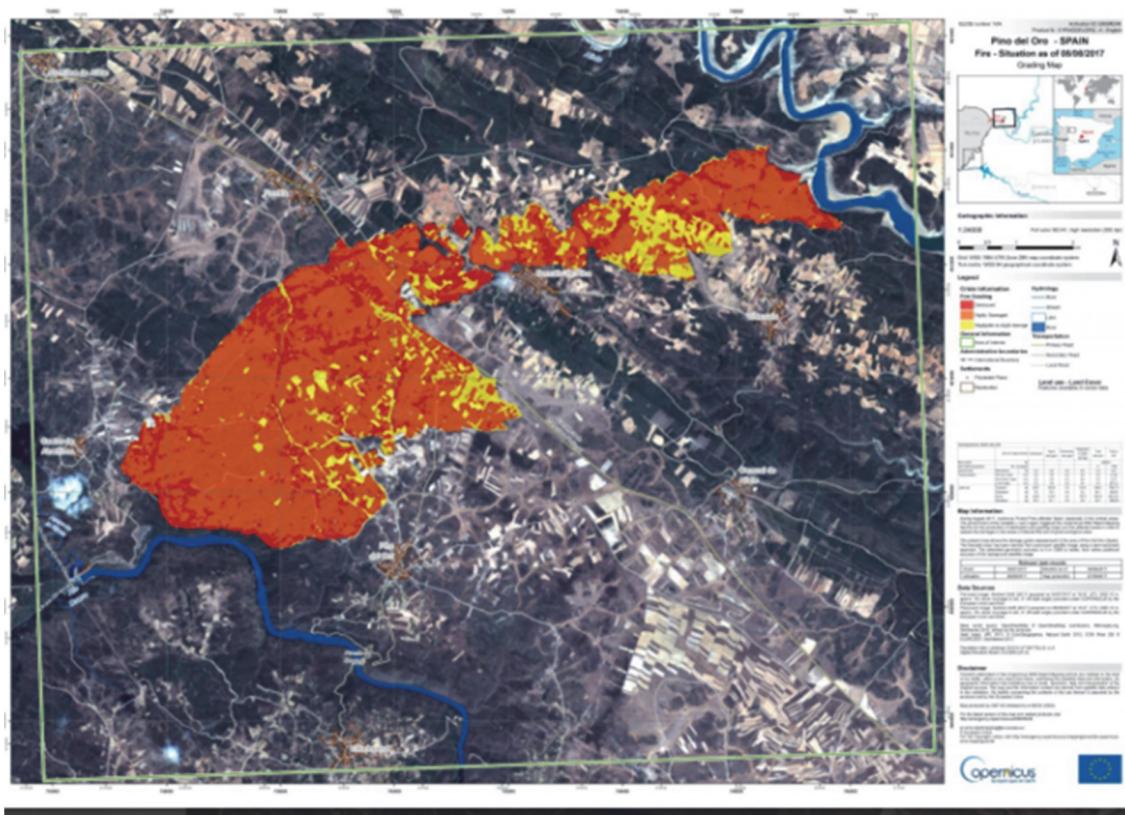
## 2.2.5. Servis za upravljanje kriznim situacijama (CEMS)

CEMS pruža informacije svim akterima uključenim u upravljanje prirodnim katastrofama, ljudskim potrebama i humanitarnim krizama s pravovaljanim i preciznim geo-prostornim podacima izvedenim iz satelitskih Sentinel misija i dopunjениm in-situ mjeranjima.

Copernicus EMS se sastoji od dvije komponente:

- Komponenta za kartiranje
- Komponenta za rana upozorenja.

Proizvodi koje generira servis mogu se koristiti kao digitalne karte ili se mogu kombinirati s drugim izvorima podataka. Komponenta za rana upozorenja sastoji se od Europskog sustava prepoznavanja poplava (European Flood Awareness System, EFAS) i Europskog informacijskog sustava o šumskim požarima (European Forest Fire Information System, EFFIS). Europski sustav prepoznavanja poplava (EFAS) daje pregledе o tekućim i prognoziranim poplavama u Europi do 10 dana unaprijed pa se može povećati pripravnost, prevencija i smanjenje rizika od katastrofe. Europski informacijski sustav šumskih požara (EFFIS) pruža gotovo stvarnu (engl. real-time) informaciju o šumskim požarima i šumskim požarnim režimima u europskim, bliskoistočnim i sjevernoafričkim regijama. Na slici 5 je prikazana digitalna karta rizika od pojave požara (područja crvenom bojom imaju najveću mogućnost pojave požara) ([Copernicus 2018](#)).



*Slika 5. Karta rizika pojave požara, ([Copernicus 2018](#))*

## 2.2.6. Servis za sigurnost (CSS)

Cilj servisa za sigurnost je podržati politike EU pružanjem informacija kao odgovor na sigurnosne izazove Europe. Poboljšava prevenciju krize, priprema i daje odgovor na tri ključna područja:

- Nadzor nad granicom
- Pomorski nadzor
- Podrška vanjskom djelovanju EU.

U području nadzora granice glavni ciljevi su: smanjenje broja ilegalnih imigranata koji ulaze u EU neotkriveni, smanjivanje broja poginulih ilegalnih imigranata, spašavanje više života na moru, povećanje unutarnje sigurnosti Europske unije kao cjeline i doprinos prevenciji prekograničnog kriminala. U području pomorskog nadzora opći cilj su: osiguranje pomorske sigurnosti u plovidbi, podrška kontroli ribarstva, borba protiv onečišćenja mora i provođenje zakona ([Copernicus 2018](#)).

## 3. PRIMJERI

Ovo poglavlje prikazuje dva primjera upotrebe Copernicus sustava u svrhu određivanja oštećene vegetacije požarom i potkornjakom.

### 3.1. Analiza stanja vegetacije prije i nakon šumskih požara

Šumski požari velika su opasnost za šumska zemljišta i šume u Republici Hrvatskoj, a posebno u Dalmaciji, na otocima i u Dalmatinskoj zagori. Njihov broj se povećava, a s time i štete ogromnih razmjera. Cilj je pokazati štetu nastalu požarom korištenjem Copernicus satelitske komponente. Podaci su se skupljali satelitima Sentinel 2, kojima se mogu razlikovati tri prostorne rezolucije: 10m, 20m i 60m. Prostorna rezolucija definirana je veličinom objekta koji je moguće raspoznati na snimci ([Jovanović & Župan 2017](#)).

Da bi se došlo do podatka koji se mogu kartirati, treba se izračunati NBR, tj. normalizirani indeks opožarene vegetacije prema **jednadžbi (1)**:

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (1)$$

Gdje su:

NBR - indeks opožarene vegetacije

NIR - vrijednost infracrvenog kanala jednog piksela slike

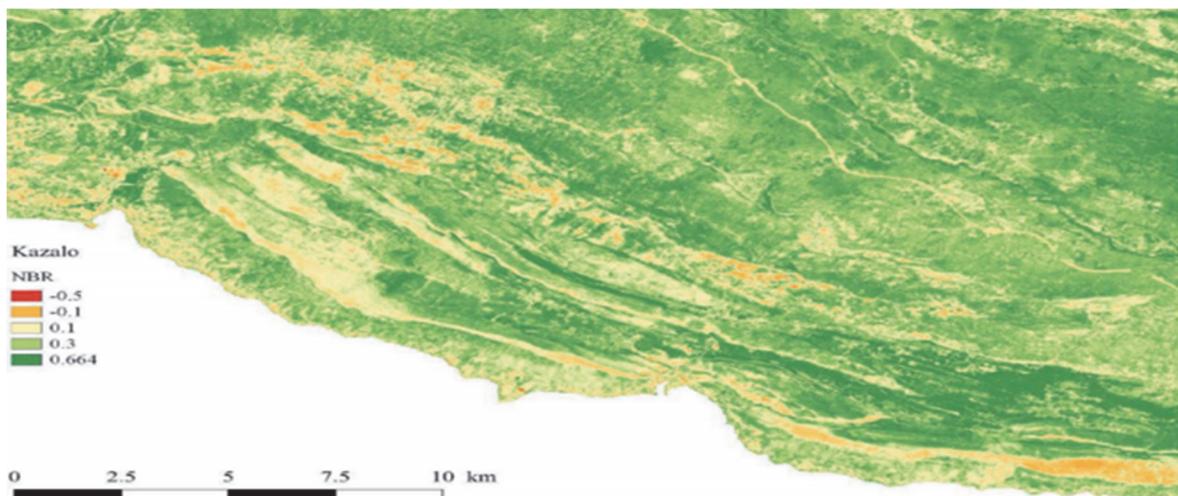
SWIR - kratko infracrveni kanal.

Nakon toga se računa  $\Delta NBR$ , tj. indeks veličine promjene uzrokovane požarom, kao razlika indeksa opožarene vegetacije prije i poslije požara. Na temelju vrijednosti  $\Delta NBR$  indeksa opožarene vegetacije radi se interpretacija prema **Tablici 2** ([Jovanović & Župan 2017](#)).

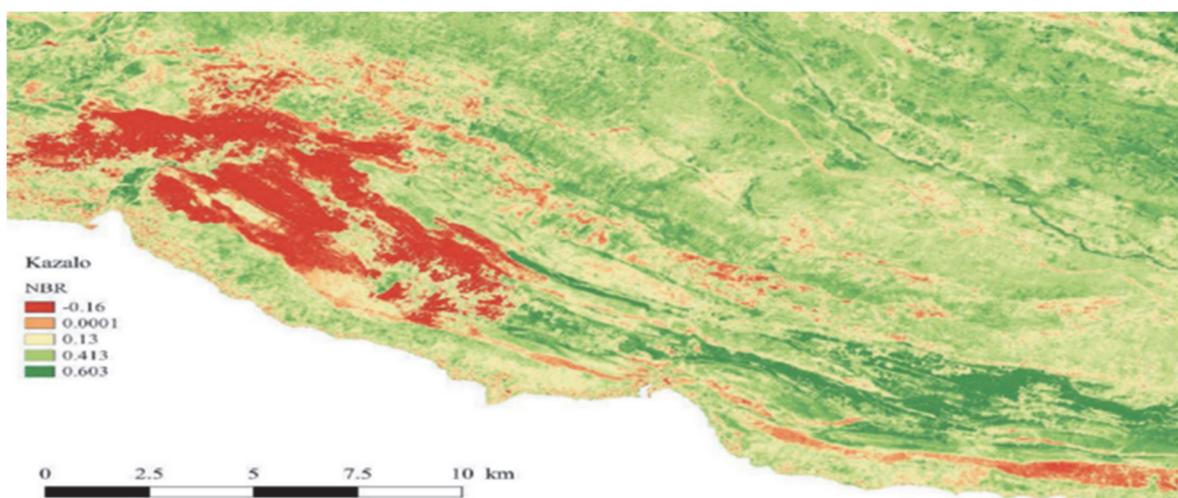
**Tablica 2. Interpretacija  $\Delta NBR$  za izgorena područja** ([Jovanović & Župan 2017](#))

$\Delta NBR$	Razina izgorenosti
< - 0,25	Visoka izgorenost za ponovni rast vegetacije
< - 0,25; - 0,1 >	Niska vjerojatnost za ponovni rast vegetacije
< - 0,1; 0,1 >	Neizgorena područja
< 0,1; 0,27 >	Niska izgorenost
< 0,27; 0,44 >	Umjereno niska izgorenost
< 0,44; 0,66 >	Umjereno visoka izgorenost
> 0,66	Visoka izgorenost

Konačni proizvod prikazan je na **Slikama 6 i 7**. Uspoređeno je stanje vegetacije prije i nakon požara, a iz vidljive razlike lako dobije površina uništene vegetacije.



*Slika 6. Stanje vegetacije prije požara (Jovanović & Župan 2017)*



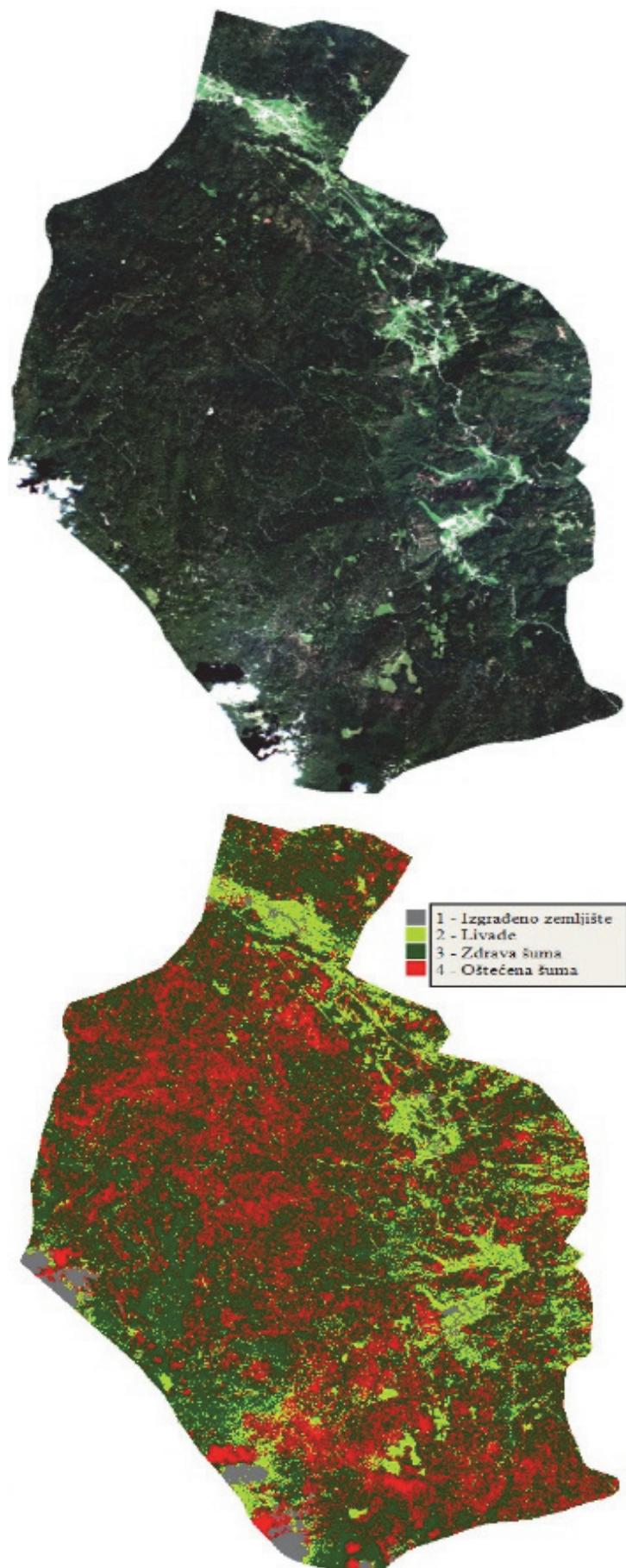
*Slika 7. Stanje vegetacije poslije požara (Jovanović & Župan 2017)*

### 3.2. Prikupljanje satelitskih hiperspektralnih snimaka i kartografski prikaz šuma oštećenih potkornjakom na području grada Čabra

Potkornjak isto kao i požari predstavlja prijetnju šumskim ekosustavima. Smrekov pisar i šesterozubi smrekov potkornjak najvažniji su štetnici smreke u Evropi. (Kasumović 2016). Glavna karakteristika šuma oštećenih potkornjakom je u promjeni boje krošnje, od žute prema crvenoj. Najbolja vidljivost oštećenih šuma je u kasno proljeće ili ljetu, jer je ostatak zdrave vegetacije zelene boje. (Kasumović 2016). Od 2014. godine velike površine šuma u Gorskem kotaru oštećene su potkornjakom. Da bi se suzbilo njegovo daljnje širenje, potrebno je oštećena drva srušiti. Budući da se radi o vrlo velikom području, potrebno je imati mogućnost određivanja područja zahvaćenosti brzom i preciznom metodom. To se ostvaruje primjenom nadzirane klasifikacije na satelitskim snimkama. Na Slici 8 vidljivo je područje prikazano u RGB kompoziciji boja i područje nakon klasifikacije. Tablica 3 prikazuje broj piksela po klasi i izračunate površine po navedenim klasama (Kranjčić et al. 2018).

**Tablica 3. Broj piksela po klasi i pripadajuće površine (Kranjčić et al. 2018)**

Broj klase	Broj piksela po klasi	Površina (ha)	Postotak (%)
1	5937	813,12	3,2
2	33 788	2933,02	11,5
3	50 858	13692,87	53,5
4	138 820	8134,33	31,8
<b>Ukupno</b>	<b>229 405</b>	<b>25 573,43</b>	<b>100,0</b>



*Slika 8. RBG kompozicija (gore) i područje nakon klasifikacije (dolje) (Kranjčić et al. 2018)*

## 4. ZAKLJUČAK

Copernicus je razvojni program Europske unije u koji će se ulagati znatna sredstva u slijedećem razdoblju. Glavna tematska područja (zemlja, more, atmosfera, promjena klime, upravljanje hitnim intervencijama i sigurnost) definiraju osnovne smjerove razvoja, ali Copernicus podaci će imati puno širi raspon primjena. Kao rezultat se dobiva cijeli niz geoprostornih proizvoda i usluga koje će utjecati na tržište geoprostornih podataka. Program bi trebao poboljšati sigurnost, održivi razvoj, načine upravljanja prirodnim resursima, zaštitu okoliša, praćenje klimatskih promjena i drugo. Satelitske snimke u kombinaciji s in-situ mjerjenjima imaju važnu ulogu u kartiranju područja pogodjenih nekom prirodnom nepogodom (npr. požar), kao i završnoj fazi sanacije tih područja. Njihova prednost je da je korištenje besplatno, a jednostavna primjena omogućava precizna kartiranja malih područja. Uz sve navedeno, očigledno je da je Copernicus, već sad jedan od najboljih online servisa što se tiče rezolucije i količine dostupnih podataka. Samim time cijeli Copernicus program ima svijetu budućnost, a očekivano je da će dalnjim razvojem servisa, kvalitete proizvoda i vremenu snimanja postati najbolji servis za praćenje prirodnih nepogoda i ostalih atmosferskih pojava.

## 5. LITERATURA

- Copernicus, <http://copernicus.eu/>, (04. 06.2018.)  
 Copernicus overview, [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Overview4](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4) (01. 06. 2018.)  
 Copernicus sateliti, <http://copernicus.eu/main/sentinels> (01.06. 2018.)  
 Europska agencija za okoliš, <http://www.eea.europa.eu/> (01.06. 2018.)  
 In-situ opažanja, <http://insitu.copernicus.eu/observations> (01. 06. 2018.)  
 Jovanović, N., Župan, R. (2017): Analiza stanja vegetacije prije i nakon šumskih požara pomoću satelitskih snimaka Sentinel-2 na području Dalmacije, Geodetski list, Vol. 71 (94) No. 3.  
 Kasumović, L. (2016): Prilagodba razvojnoga ciklusa, prezimljavanja i prostorne distribucije smrekovih potkornjaka (*Ips typographus* L. i *Pityogenes chalcographus* L.) u odnosu na temeljne stanišne čimbenike, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet  
 Kranjčić, N., Župan, R., Rezo, M. (2018): Satellite-based hyperspectral imaging and cartographic visualisation of bark beetle forest damage for the city of Čabar, Tehnički glasnik, Vol. 12, No.1, 39-43.  
 Martinić, L. (2015): Copernicus program opažanja Žemlje. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomski rad. 2015. Zagreb.  
 Portal za opažanje Zemlje, <https://directory.eoportal.org> (01. 06. 2018.)  
 Sentinel Scientific Data Hub  
[\(http://copernicus.eu/sites/default/files/Data\\_Access/Data\\_Access\\_PDF/Factsheet\\_Data\\_Access\\_Copernicus\\_Sentinel\\_Data\\_Hub.pdf\)](http://copernicus.eu/sites/default/files/Data_Access/Data_Access_PDF/Factsheet_Data_Access_Copernicus_Sentinel_Data_Hub.pdf)  
 Službena web stranica Sentinel misija, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions> (01. 06. 2018.)  
 SpaceTec partners (2012): Publishable Executive Summary: Assessing the Economic Value of Copernicus: European Earth Observation and Copernicus Downstream Services Market Study.  
 Specific Contract under the Framework Service Contract 89/PP/ENT/2011 – LOT 3. SpaceTec partners (2013): Final Extended Executive Summary: European Earth Observation and Copernicus Midstream Market Study, Specific Contract under the Framework Service Contract 89/PP/ENT/2011 – LOT 3.  
 Vrgoč, S. (2017.) Primjena worldview-2 satelitskih snimaka za detekciju ilegalnih odlagališta otpada. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomski rad. 2017.

# UTJECAJ NOVE REGULATIVE EU ZA KORIŠTENJE BESPILOTNIH LETJELICA NA TEHNOLOGIJE KARTIRANJA I NADZORA PLINOVODA

## INFLUENCE OF NEW EU REGULATION FOR USE OF UNMANNED AIRCRAFT IN MAPPING AND GAS PIPELINE MONITORING

Darko Pavlović <sup>1\*</sup>, Antonije Bolanča <sup>2</sup>, Miroslav Golub <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Plinacro d.o.o., Savska cesta 88a, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> Hrvatski operator tržišta energije d.o.o., Ulica grada Vukovara 284, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>3</sup> Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

\*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: darko.pavlovic@plinacro.hr

**Sažetak:** Nadzor trase plinovoda predstavlja izrazito važnu sigurnosnu radnju. Tehnološki razvoj omogućio je primjenu novih tehnologija u sustavima nadzora i omogućio izradu 3D karti trase plinovoda. Značajni pomak vidljiv je kroz primjenu letjelica za izradu nove generacije snimki i digitalnih prikaza trase plinovoda, te za primjenu letjelica s ugrađenim senzorima za detekciju i snimanje izvan vidljivog spektra. S obzirom na nažalost lokalne specifičnosti, (a u Republici Hrvatskoj sveprisutne) kao što su ilegalna gradnja i ostavljanje otpada u zaštićenom pojasu plinovoda, važno je izgraditi sustav nadzora koji može pravovremeno aktivirati preventivne procedure sukladno potrebama. Namjera ovog rada je ukazati na sigurnosne aspekte važnosti kontinuiranog nadzora nad trasom plinovoda, pri tome je važno istaći da nova generacija snimki s automatskom izradom 3D prikaza trase, značajno olakšava definiranje nove trase plinovoda. Slijedom navedenog, namjera autora ovoga rada je prikazati buduću regulativu na nivou EU, trenutačna tehnološka rješenja i moguću primjenu.

**Ključne riječi:** Kartiranje, nadzor, trasiranje plinovoda, sigurnost.

**Abstract:** Monitoring of the pipeline route is extremely important safety operation. Technological development has enabled the application of new technologies in the surveillance system and facilitated the development of a 3D map of the pipeline route. Significant improvement has been the application of the use of the aircraft to create a new generation of digital images and display the route of the pipeline and of the use of the aircraft with built-in sensors to detect and record outside the visible spectrum. Due to local specifics, such as illegal construction and placing of waste in the protected zone of the pipeline, it is important to build a monitoring system that can be activated in a timely manner in accordance with the needs of preventive procedures. In particular, the intention of this paper is to point out the importance of the safety aspects of ongoing supervision of the pipeline route. It is also important to note that the new generation of recordings with automatic production of 3D display of the route, significantly facilitates the definition of new pipeline. Consequently, the intention of the author of this paper is to present future EU-level regulation, current technological solutions and possible application.

**Keywords:** Corridor mapping, supervision, proposing natural gas pipeline routes, safety.

Received: 16.07.2018. / Accepted: 04.08.2018.

Published online: 17.12.2018.

Pregledni rad / Review paper

### 1. UVOD

Sustavi bespilotnih letjelica (dalje: UAS - engl: *Unmanned Aircraft Systems*), mogu pružiti veliki potencijal u raznim sektorima zbog usluga koje pružaju; precizna poljoprivreda, inspekcija, energetika, sigurnost i isporuka samo su neki od primjera kako bi na različite sektore mogao utjecati UAS. Upotreba UAS-a može donijeti sljedeće prednosti:

- sigurniji način poslovanja bez rizika za ljudske živote,
- dodatni posao (npr. nove usluge),
- učinkovitost,
- stvaranje mogućnosti zapošljavanja.

Međutim, operativni UAS-i u sadašnjem zrakoplovnom okruženju izazivaju zabrinutost zbog sigurnosti, privatnosti, zaštite podataka i okoliša. Izazov je, stoga, razviti pravila koja će zadovoljavajuće rješavati te zabrinutosti, dopuštajući istovremeno da se tržište usluga UAS-a u potpunosti razvije.

Svrha nove EU regulative je osigurati:

- kvantitativna i kvalitativna analiza, na temelju koje je odabrana najpovoljnija mogućnost donošenja zakonodavnog okvira,
- razumijevanje različitih učinaka svih analiziranih opcija.

Nova osnovna uredba proširila bi nadležnost EU-a da regulira sve UAS bez obzira na njihovu maksimalnu masu polijetanja (dalje: MTOM - engl: *Maximum Take-Off Masses*).

Specifični problemi UAS-a:

- nedostatak jasnoće i neusklađenog definiranja kategorija granica djelovanja UAS-a, uključujući nerazmjerna pravila za posebne kategorije,
- nedostatak zaštite osjetljivih područja,
- neodgovarajući tehnički zahtjevi,
- nedostatak klasifikacije zračnog prostora i pravila za operacije niske razine,
- neodgovarajuće ovlasti udaljenih pilota,
- potreba za upisom i identifikacijom.

Osnovne grupe rizika i prepreka u razvoju UAS-a:

- zemaljski rizik (nesreće / incidenti koji uključuju osobe na tlu ili osjetljiva područja),
- zračni rizik (rizik sudara, blizina zraka, nesreće i incidenti s upravljanim zrakoplovima),
- kršenje privatnosti, zaštite podataka i sigurnosti,
- prepreke tržištu, opterećenje industriji, zatvoreni potencijal za inovacije i razvoj.

Prve dvije posljedice strogo su povezane sa sigurnošću i analizirane su detaljnou procjenom sigurnosnih rizika.

Očigledno je da postoji potencijalni visoki sigurnosni rizik, posebice uzimajući u obzir brzi razvoj tržišta UAS-a.

Kako bi se riješio identificirani rizik, predložene su tri opcije, zajedno s odgovarajućom analizom utjecaja na temelju različitih kriterija (socijalni, ekonomski, sigurnosni). Ti skupovi opcija koji se nadopunjaju, pokrivaju sljedeća područja:

- Otvorena kategorija: cilj nove EU regulative je postizanje ravnoteže između operativnih ograničenja (UAS MTOM, udaljenost od gužve, visine UAS-a), sposobnosti i dobi daljinskog pilota, kao i tehničkih zahtjeva,
- Registrirana: cilj nove EU regulative je najviše vezana uz rizike sigurnosti i privatnosti,
- Posebna kategorija: cilj nove EU regulative je autorizaciji takvih operacija.

Prilikom razmatranja utjecaja analizirani su podaci od stručne skupine, kao i rezultatima anketiranja poslanih i odgovorima nadležnih tijela, proizvođača, operatera modela zrakoplova, udruga i škola za osposobljavanje.

Preporučene opcije za svako područje:

- Otvorena kategorija: Opcija koja odgovara proporcionalnom pristupu između tehničkih zahtjeva UAS-a, operativnih ograničenja i sposobnosti daljinskog vođenja pilota, postiže najbolji kompromis između sigurnosti i troškova, a ima i dobar društveni učinak. Podkategorizacija i definicija područja zračnog prostora ili posebnih zona pružaju fleksibilnost.
- Registrirana: registraciji svih operatora koji upravljaju bespilotnim letjelicama s MTOM-om većim od 250 g, kao i registracije osobe koja upravlja kada UAS ima MTOM veći od 900 g, dobra ravnoteža između veličina UAS-a, razmjerna njegovoj potencijalnoj opasnosti, i povezani ekonomski učinak. Opcenito, registracija kao opcija uglavnom je prouzročena razlozima provedbe zakona, kao i rizikom sigurnosti i privatnosti. U tom smislu registracija postiže najbolji kompromis između troškova i ublažavanja tih rizika, s obzirom da UAS s MTOM-om manjim od 900 g čini oko 50 % postojećeg tržišta.

Specifična kategorija: Predlaže se dopuniti dozvolu potrebnu za obavljanje poslova UAS-a sa standardnim scenarijima koje je izdao EASA (engl: *European Aviation Safety Agency*), čime se znatno smanjuje teret operatora i nadležnih tijela. Osim toga, operater može odlučiti podnijeti zahtjev za lagani UAS operator certifikat s krajnjom privilegijom da odobri svoje vlastite operacije.

## 2. NADZOR TRASE PLINOVODA

Nadzor trase plinovoda predstavlja važan segment unutar sustava sigurnosti opskrbe, a sve veću važnost poprima unutar okvira opće sigurnosti. Naime, promatrajući energetski intenzivne djelatnosti, očito je da su investicije u takve sustave izrazito velike te dugoročno planiranje sigurnosnih aktivnosti i nadzora predstavlja jednu vrlo važnu kariku u širem kontekstu energetske sigurnosti.

Sigurnost se može sagledati iz dva osnovna pravca. Prvi pravac kao imperativ nameće kontinuiranu opskrbu korisnika, a drugi pravac predstavlja sigurnost sustava od pojave neželjenih aktivnosti po ljudi, okolini i finansijske gubitke proizašlih iz istjecanja plina.

Osnovni dokumenti koji propisuju osiguravanje kvalitete su: norma HRN EN 14 161: Industrija naftne i prirodnog plina - Sustav transporta cjevovodima, ANSI/ASME B31.8: Gas transmission and distribution piping system te Pravilnik o tehničkim uvjetima i normama za siguran transport tekućih i plinovitih ugljikovodika magistralnim naftovodima i plinovodima te naftovodima i plinovodima za međunarodni transport (SL 26/1985).

Cjevovodi se grade već desetljećima (**Slika 1**). Razvoj novih materijala i tehnologija izrade, izgradnje i nadzora ubrzano napreduje te se pojavljuje potreba za definiranjem minimalnih uvjeta kvalitete koji se moraju ispuniti prilikom izrade cijevi i cjevovoda. Poznato je da havarija cjevovoda može dovesti do ljudskih žrtava i do teških posljedica za okoliš. Stoga je radi pravovremenog sprječavanja takvih scenarija nužno poznavati i definirati sve čimbenike osiguravanja kvalitete koji utječu na integritet cjevovoda.



**Slika 1. Izgradnja plinovoda Benkovac - Dugopolje - kanjon Guduča (Izvor: PLINACRO d.o.o.)**

Vođeni ovom mišlju, autori ovog rada imaju namjeru opisati i na primjerima pokazati specifičnosti sustava nadzora i metode prilikom realizacije, polazeći od potrebe kvalitetnog poznavanja trase prilikom projektiranja i izrade sustava transporta prirodnog plina, kao i metode nadzora stanja i aktivnosti u neposrednoj blizini sustava.

Uvažavajući navedeno u radu su razmotrene moguće smjernice u svrhu budućih poboljšanja nadzora trase plinovoda, pri čemu osiguravanje kvalitetnog nadzora te optimalno investiranje u segmentima nadzora uz postizanju veće sigurnosti strateške energetske infrastrukture nesumnjivo predstavlja jedan od glavnih imperativa.

Ipak, ako pogledamo sa aspekta ekonomije, zračno fotografiranje/snimanje, provjera plinovoda, dalekovoda, naftovoda, nadgledanje šumskih požara, elementarnih katastrofa su samo neki od mnogih primjena koje bespilotna letjelica može jednako dobro obaviti, ako ne i bolje. Tako primjerice, u Japanu se bespilotna letjelica koristi u svrhu zaprašivanja polja, dok Američka savezna država Arizona, (koja graniči sa Meksikom i ima velikih problema sa imigrantima) svoje granice nadzire pomoću bespilotnih letjelica.

### 3. DEFINICIJA BESPILOTNIH LETJELICA

Bespilotna letjelica (UAS - engl: *Unmanned Aircraft Systems* ili UAV- engl: *Unmanned Aerial Vehicle*) je letjelica ili zrakoplov bez posade, koja se može nadzirati na daljinu ili letjeti samostalno uporabom unaprijed programiranog plana leta ili pomoću složenih autonomnih dinamičkih sustava (**Slika 2**).



**Slika 2. Bespilotna letjelica ([www.flyroutine.com](http://www.flyroutine.com))**

U Republici Hrvatskoj je definiran pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (dalje: Pravilnik) - "Narodne novine", Br.: 49. od 6. svibnja 2015. godine. Ovim Pravilnikom propisuju se opći, tehnički i operativni uvjeti za sigurnu uporabu bespilotnih zrakoplova, sustava bespilotnih zrakoplova i zrakoplovnih modela te uvjeti kojima moraju udovoljavati osobe koje sudjeluju u upravljanju tim zrakoplovima i sustavima. Odredbe ovoga Pravilnika primjenjuju se na sustave bespilotnih zrakoplova, operativne mase bespilotnog zrakoplova do i uključujući 150 kilograma koji se koriste u Republici Hrvatskoj. Odredbe Pravilnika ne primjenjuju se na sustave bespilotnih zrakoplova kada se koriste za državne aktivnosti (vojne, policijske, sigurnosno-obavještajne, carinske, potrage i spašavanja, gašenja požara, obalne straže i slične aktivnosti ili službe).

## 4. PRAVNA REGULACIJA BESPILOTNIH ZRAKOPLOVA

### 4.1. Trenutna regulativa u Republici Hrvatskoj

Prema članku 3. navedenog Pravilnika, bespilotni zrakoplovi kojima se izvode letačke operacije s obzirom na operativnu masu, dijele se na:

1. Klasa 5: do 5 kilograma,
2. Klasa 25: od 5 kilograma do 25 kilograma,
3. Klasa 150: od 25 kilograma do i uključujući 150 kilograma.

Pri tome je važno naglasiti da prema članku 4. istog Pravilnika u odnosu na izgrađenost, naseljenost i prisutnost ljudi, područja letenja dijele se na klase:

1. Klasa I - Područje u kojem nema izdignutih građevina ili objekata i u kojem nema ljudi, osim rukovatelja i osoblja koje je nužno za letenje.
2. Klasa II - Područje u kojem postoje pomoćni gospodarski objekti ili građevine koje nisu namijenjene za boravak ljudi i u kojem nema ljudi, osim rukovatelja i osoblja koje je nužno za letenje. Dozvoljen je samo povremeni prolazak, bez zadržavanja, ljudi kroz područje (biciklisti, šetači i sl.).
3. Klasa III - Područje u kojem postoje građevine ili objekti primarno namijenjeni za stanovanje, poslovanje ili rekreaciju (stambene zgrade, stambene kuće, škole, uredi, sportski tereni, parkovi i slično).
4. Klasa IV - Područje uskih urbanih zona (središta gradova, naselja i mjesta).

Kategorija letačkih operacija, prikazane u **Tablici 1.** određuju se razinom rizika koje njihovo izvođenje predstavlja za okolinu.

Letenje zrakoplovnim modelom dozvoljeno je u područjima letenja Klase I i II, a letenje iznad skupine ljudi ili iznad industrijskog područja u kojem uslijed pada bespilotnog zrakoplova postoji mogućnost zapaljenja ili eksplozije, smatra se izvođenjem letačkih operacija kategorije D. Razvidno je da upravo klasa D predstavlja najrizičnije operacije.

**Tablica 1. Kategorije letačkih operacija, Izvor: Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova NN 49/15, boje označavaju rizike: tamno zelena-niski rizik, svjetlo zelena-srednji rizik, narančasta-visoki rizik, crvena- iznimno visoki rizik.**

Klasa sustava bespilotnih zrakoplova	Klasa područja izvođenja letenja			
	I Neizgrađeno područje	II Izgrađeno nenaseljeno područje	III Naseljeno područje	IV Gusto naseljeno područje
5 OM<5kg	A	A	B	C
25 5≤OM<25kg	A	B	C	D
150 25≤OM<150kg	B	C	D	D

Po mišljenju autora ovog rada, trenutna klasifikacija ima određenih nejasnoća. Naime, klase nisu jasno i nedvosmisleno određene i ostavljaju prostora za različito tumačenje. Primjerice, minimalne udaljenosti iz članka 11. (150 m od ljudi, te 30 m od dalekovoda, objekata, vozila itd.), ne mogu se primijeniti u klasama III i IV, jer su to urbana područja. Npr. ako se obavljaju operacije iznad Save u Zagrebu, uglavnom se mogu ispoštovati minimalne udaljenosti od 150 m od skupine ljudi, ali onda nije moguće jednoznačno odrediti klasu. Isto tako, ako vrijedi zahtjev da se operacije u klasi IV moraju događati 150 m od skupine ljudi, onda u svojoj osnovi zapravo klasa IV i ne postoji.

Pravila koja vrijede za zrakoplove ne mogu se primjenjivati za bespilotne letjelice. Stoga je nužno ustrojiti pravila i propise koji će vrijediti za bespilotne letjelice, bilo u sustavu civilne zaštite ili u okviru civilnog zrakoplovstva. Bespilotne letjelice ne smiju utjecati na sigurnost ostalih sudionika zračnog prometa, te ne smiju ih onemogućavati u njihovim nakanama.

Pri tome je vrlo važno definirati način licenciranja osoblja i pilota koji će upravljati letjelicom te uvjete dobivanja dozvole za upravljanje bespilotnom letjelicom. Plovidbenost, licenciranje, sigurnost i upravljanje zračnim prometom su samo neki od elemenata koji se moraju definirati vezano uz bespilotne letjelice.

Bespilotne letjelice su u formalnom smislu zrakoplovi i moraju udovoljavati pravilima za sigurnost zračnog prometa. Trenutačno je širenje tržišta bespilotnih letjelica onemogućeno zbog nepostojanja odgovarajućeg regulatornog okvira u većini država članica EU, te potrebom ishođenja pojedinačnih dozvola od svake države

članice gdje bi ih proizvođači htjeli prodavati, ili davatelji usluga upotrebljavati. Određeni broj država članica započeo je, na nacionalnoj razini, razvijati pravila kojima bi se olakšalo ovaj proces ishodjenja dozvola. Po mišljenju autora, u Europi neće biti moguće stvoriti stvarno a ne samo deklaratorno tržište sve dотle dok se ne izrade europske norme, a koje treba osmislići Europska agencija za sigurnost zračnog prometa (EASA - engl: *European Aviation Safety Agency*), što nažalost drastično otežava razvoj ovog sektora. Razvoj civilne primjene bespilotnih letjelica također zahtjeva osiguravanje da nijedan od njih ne predstavlja prijetnju privatnosti ili fizičkom integritetu građana. Industrija odgadja investicije dok se ne ponudi dovoljna razina zakonske sigurnosti u pogledu zakonskih okvira.

Europskom strategijom teži se osnivanju jedinstvenog tržišta bespilotnih letjelica i pratećih usluga kako bi društvo imalo koristi od ove nove tehnologije, te biti na raspolaganju građanima. Njome bi se također trebalo urediti pogodno okružje za stvaranje snažne i konkurentne proizvodne i uslužne industrije koja može konkurirati na globalnom tržištu.

Primjena bespilotnih letjelica može se razvijati samo ako zrakoplovi budu mogli letjeti u zračnom prostoru koji nije odvojen, a da pri tome ne utječu na sigurnost i rad šireg sustava civilnog zrakoplovstva. U tu svrhu EU mora uspostaviti pogodan regulatorni okvir kojem mogu pridonijeti glavni čimbenici na europskoj i nacionalnim razinama. Potrebno je također povećati i učinkovito koordinirati napore u istraživanju i razvoju usmjerene na integraciju u civilni zračni prostor, kako bi se što više smanjilo vrijeme uvođenja novih - obećavajućih tehnologija.

Regulatorni okvir treba odražavati širok raspon zrakoplova i operacija, održavati pravila razmjerima mogućim rizicima, i držati u razumnim okvirima administrativni teret za industriju i nadzorna tijela. Pri tome, regulatorni okvir se najprije treba usmjeriti na područja gdje su tehnologije zrele i gdje postoji dovoljno povjerenje. Regulatorne mјere uvest će se korak po korak, a korištenje bespilotnih letjelica za složenije zadaće bit će dopušteno postupno.

Postupna integracija bespilotnih letjelica u zračni prostor EU od 2019. nadalje mora biti popraćena odgovarajućom javnom raspravom o razvoju mјera za rješavanje problema na koje se ukazuje u društvu, uključujući sigurnost, privatnost i zaštitu podataka, odgovornost prema trećim osobama i osiguranje ili jamstvo.

#### 4.1. Nova regulativa na nivou EU nakon 2019.

Sukladno predloženoj novoj Osnovnoj uredbi za koju je 22. prosinca 2017. godine postignut politički sporazum između Vijeća, Europske komisije i Europskog parlamenta, nadležnost EU proširena je na reguliranje svih civilnih zrakoplovnih civilnih bespilotnih zrakoplovnih sustava bez obzira na njihovu maksimalnu masu polijetanja (Slika 3).

Cilj je stvaranje novog regulatornog okvira je definiranje mјere za ublažavanje rizika u:

- OTVORENOJ KATEGORIJI: kombinacijom ograničenja, operativnih pravila, zahtjeva za kompetentnost daljinskog pilota, kao tehnički zahtjevi za UAS, tako da operater UAS može obaviti rad bez prethodnog odobrenja nadležnog tijela ili bez podnošenja izjave,
- SPECIFIČNOJ KATEGORIJI: putem sustava koji uključuje procjenu rizika koju provodi operater UAS prije početka operacije ili operator koji udovoljava standardnom scenariju ili operator koji ima potvrdu s privilegijama.

Nova EU regulativa ima sljedeće ciljeve:

- implementirati uravnotežen pristup koji u središte stavlja operaciju UAS-a, razmjeran, regulacijski okvir koji se temelji na riziku i izvedbi za sve operacije UAS-a provedene u "otvorenim" i "specifičnim" kategorijama,
- osigurati visoku i ujednačenu razinu sigurnosti za operacije UAS-a,
- poticanje razvoja tržišta UAS,
- pridonijeti rješavanju zabrinutosti građana glede sigurnosti, privatnosti, zaštite podataka i zaštite okoliša.

Predloženi propisi pružit će fleksibilnost državama članicama, uglavnom dopuštajući im da stvaraju zone na njihovom teritoriju gdje bi korištenje UAS-a bilo zabranjeno, ograničeno ili, pak, olakšalo. Temeljem nove osnovne uredbe, zakonodavstvo tržišnoga proizvoda (oznaka CE) osigurava usklađenost s tehničkim zahtjevima za masovno proizvedenu UAS koja radi u "otvorenoj" kategoriji. Predlažu se dva zakona koji slijede različite postupke usvajanja kako je određeno novom osnovnom uredbom: delegirani akt kojim se definiraju uvjeti za stavljanje UAS-a na tržištu i uvjeti za operacije UAS-a koje provodi operater treće zemlje i provedbeno pravilo koji definira uvjete za rad UAS-a i uvjete za registraciju. Očekuje se da će predloženi regulatorni okvir povećati razinu sigurnosti operacija UAS-a, uskladiti zakonodavstvo među članicama EU i stvoriti tržište EU koje će smanjiti troškove UAS-a i omogućiti prekogranične operacije, nove usluge i razviti ovu granu gospodarstva.

UAS koji je stavljen na tržište nakon 2019. nosit će nove oznake za identifikaciju klase a njime upravljaju prema posebnim ograničenjima klase, što je sažeto u letku koju nalazim u njegovoj ambalaži. Također su uvedene dvije kategorije za samogradnju odnosno modelarstvo. Prva kategorija odnosi se na modele sa MTOM manjom od 250 g a druga se odnosi na modele sa MTOM manjom od 25 kg. Za svaku od kategorija određeni su posebni propisi.

## 5. ŠIRENJE BESPILOTNIH LETJELICA U CIVILNE SVRHE

Civilno zrakoplovstvo pridonosi integriranim logističkim prijevoznim lancu, čija je namjena što bolje služiti građanima i društvu. Bespilotne letjelice predstavljaju ogroman potencijal za razvoj društva, otvaranje novih radnih mesta i ostvarivanje raznih korisnih zadataka.

➤ Razvoj novih usluga

Bespilotne letjelice se već koriste u civilne svrhe, a u budućnosti će se koristiti još više. Tehnologije bespilotnih letjelica bi u budućnosti trebale dovesti do razvoja širokog spektra usluga, posebno ako se kombiniraju sa drugim tehnologijama (u ovom slučaju fotografiranje, snimanje montaža senzora i snimke izvan vidljivog spektra), ili biti oslonac drugim tehnologijama (poput izrade digitalnih karata s objektima i kalkulacija udaljenosti i dimenzija). Točnu prirodu i opseg mogućih operacija bespilotnih letjelica danas je teško predvidjeti, no u vremenskom horizontu od nekoliko godina, očekuje se da će se uslugama stvarati dovoljno prihoda kojima bi se podupiralo razvoj same proizvodne industrije.

Na drugim kontinentima, operateri bespilotnih letjelica koriste se za potporu preciznoj poljoprivredi jer pridonose učinkovitijoj i pravovremenoj uporabi gnojiva i pesticida. U Europi, bespilotne letjelice se koriste za pregled sigurnosti infrastrukture, primjerice plinovoda, željezničkih pruga, brana, nasipa ili elektroenergetskih mreža. Nacionalne vlasti koriste ih u operacijama pomoći u izvanrednim situacijama, npr. za prelet poplavljениh područja ili za potporu gašenju požara. Također, u tijeku je razvoj bespilotnih zrakoplova koji bi mogli biti od pomoći u slučajevima istjecanja plina ili kemikalija.

➤ Rast radnih mesta

Razvoj i usavršavanje tehnologije bespilotnih letjelica ključ je konkurentnosti europske zrakoplovne industrije. Trenutno, SAD i Izrael imaju globalnu dominaciju u sektoru proizvodnje bespilotnih letjelica, jer svoja iskustva temelje na vojnim bespilotnim letjelicama. Snažno zajedničko tržište EU trebalo bi biti solidna osnova za konkuriranje na globalnoj razini, stoga pravna regulacija ne samo da bi regulirala proizvodnju, već bi omogućila i izvođenje operativnih zadataka, od jednostavnih prema složenijim zadacima. To bi nedvojbeno omogućilo korisnicima da steknu praktično iskustvo i postupno razviju djelatnost.

Točan opseg potencijalnog tržišta za bespilotne letjelice teško je predvidjeti. Prema različitim i javno dostupnim izvorima podataka, predviđa se da će proračuni za istraživanje, razvoj i nabavu, uključujući i vojne i vladine sektore, na globalnoj razini rasti sa sadašnjih 7 milijardi USD, na oko 14 milijardi USD godišnje u 2025.

Iskustvo pokazuje da se tržišta mogu razvijati brzo nakon što se uspostavi povoljan politički okvir. Predviđanja ističu da bi rastuća uporaba bespilotnih letjelica trebala u konačnici rezultirati i znatnim brojem novih radnih mesta. Tako primjerice, Američka industrijska studija predviđa da će u prve tri godine integracije bespilotnih letjelica u nacionalni zračni prostor, biti stvoreno preko 70 000 radnih mesta, s ekonomskim učinkom od preko 13,6 milijardi USD. Broj radnih mesta koja će biti stvorena novom uporabom bespilotnih letjelica u SAD-u procjenjuje se na preko 100 000 do 2025. U Europi, predviđa se 200 000 radnih mesta do 2050., te dodatna radna mesta koja će se stvarati uslugama operatera. Potencijal za rast može biti iskorišten samo ako se uspostavi poticajni pravni okvir na europskoj razini. Europska industrija neprestano poziva na stvaranje takvih pravila, kojima bi se dopustila uporaba bespilotnih zrakoplova u civilne svrhe, uz istovremeno osiguravanje potrebne visoke razine sigurnosti i privatnosti, što su preduvjeti da javnost prihvati bespilotne zrakoplove.

Europska komisija je razvila strategiju za potporu progresivnog razvoja tržišta bespilotnih letjelica u Europi, dok rješavaju potencijalne probleme kao što su sigurnost, zaštita, privatnost, odgovornost i javnog prihvaćanja. Strategija je iznesena u dokumentu Europske komisije usvojenog 8. travnja 2014.

Pri tome je važno naglasiti da se Strategija fokusira na daljinski upravlјivim zrakoplovnim sustavima koji predstavljaju bitan korak prema zrakoplovnom tržištu budućnosti. Isto tako, na europskom samitu od 19. prosinca 2013. pozvalo se na djelovanje kako bi se omogućila postupna integracija UAS-a u civilni zračni prostor od 2019.

Međunarodnim dogovorom zračni prostor je podijeljen u klase od A do G. Klasa zračnog prostora označava kompleksnost operacije, odnosno razinu upravljanja zračnim prometom (ATM –engl: Air Traffic Management) i minimalnu razinu opreme i sposobnosti pilota potrebnih za let u toj klasi zračnog prometa. U klasi A se pruža puna ATM usluga, odnosno razdvajaju se svi zrakoplovi, i klasa A je rezervirana za profesionalne pilote koji lete komercijalne zrakoplove. Suprotno klasi A je klasa G i u njoj lete mali zrakoplovi, kao i većina bespilotnih letjelica, i tu se većinom ne pruža ATM usluga.

Trenutno većina bespilotnih letjelica leti ispod 500 ft (152.4 m), odnosno u G klasi zračnog prometa. Iako ovaj zračni prostor nije odvojen u njemu većinom nema puno prometa i to su većinom mali sportski zrakoplovi. Klasa G je nekontrolirani zračni prostor, odnosno ne pruža se usluga kontrole zračnog prometa.

Europski plan za integraciju bespilotnih zrakoplova opisuje razvoj i integraciju civilnih UAS-a u zajednički zračni prostor u sljedećih 15 godina.

Plan izričito opisuje tri stupa:

1. istraživanje i razvoj;
2. sigurnosne propise i tehničku standardizaciju, te dodatne mjere kao što su poštovanje privatnosti i zaštita podataka;
3. osiguranje i odgovornost.

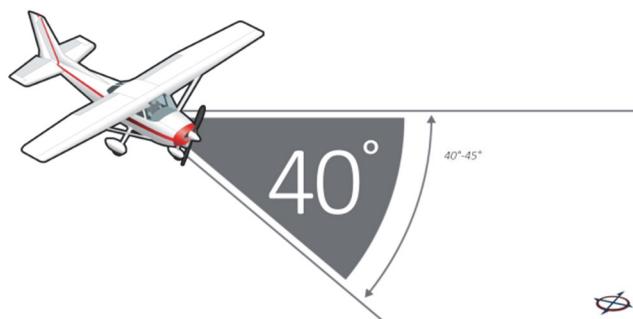
U Hrvatskoj regulativi pojavljuje se nažalost dosta problema. Upravo zbog toga razloga stvorena je i udruga HUKOBS (*Hrvatska Udruga Korisnika i Operatora Bespilotnih Sustava*) koja svojim radom i stručnošću pomaže u izradi pravilnika.

## 6. NOVA TEHNOLOŠKA RJEŠENJA U KARTIRANJU I NADZORU TRASE PLINOVODA

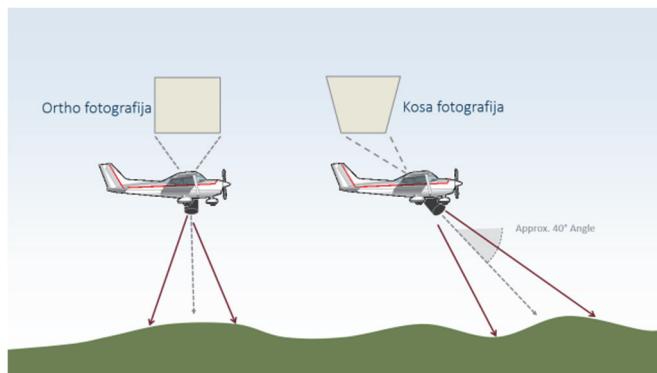
Sustav za snimanje koji smo uzeli kao primjer koristi 29 megapikselski *Pentaview imaging* sustav koji je izgrađen na USGS (*United States Geological Survey*) odobrenoj platformi i uključuje unaprijedjeni senzor od 29 megapiksela. Pictometry C6 sustav sastavljen je od šest prilagođenih kamera i sustava za položajnu i orijentaciju sustava koji uključuje i GPS (*Global Positioning System*) antenom i merna jedinica. Šest kamera snima sa preklapanjem polja snimanja od približno 33 %. Dobiveni podaci imaju točnost otprilike  $\pm 0.3\%$  od mjerene udaljenosti.

### ➤ Fotografiranje i snimanje iz zraka

Ortho fotografiranje predstavlja posebno područje budućih poboljšanja (**Slika 4, Slika 5 i Slika 6**). Nakon klasične tehnologije vertikalnog fotografiranja, razvijena je nova tehnologija s kosim snimkama istog područja iz različitog kuta. Tehnologija rezultira izradom 3D prikaza područja s vidljivom konfiguracijom terena i pruža mogućnost izračuna udaljenosti i dimenzije objekata.



*Slika 4. Kut kosog fotografiranja ([www.pictometry.com](http://www.pictometry.com))*



*Slika 5. Format tla zahvaćen kosom fotografijom ([www.pictometry.com](http://www.pictometry.com))*



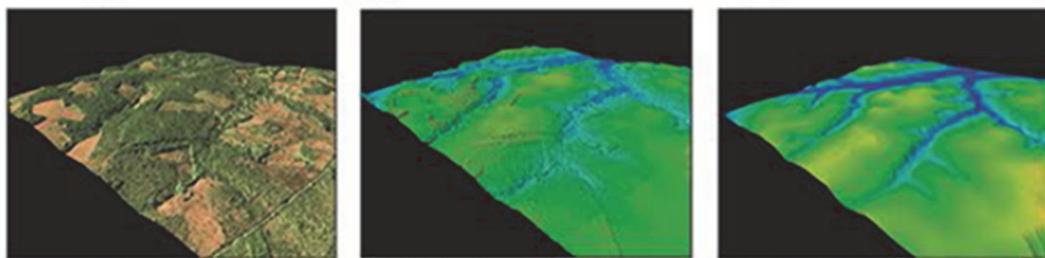
*Slika 6. Koridor fotografiranja ([www.pictometry.com](http://www.pictometry.com))*

➤ Izrada 3D karata

Izrada 3D karata od fotografija dobivenih kosom fotografijom iz više kutova predstavlja značajnu tehnološku novost u obradi podataka (**Slika 7** i **Slika 8**). 3D karta je lakša za korištenje, a planiranje je brže i kvalitetnije.



*Slika 7. 3D prikaz naseljenog područja ([www.pictometry.com](http://www.pictometry.com))*



*Slika 8. 3D prikaz nenaseljenog područja ([www.pictometry.com](http://www.pictometry.com))*

➤ Korištenje dronova i ostalih bespilotnih letjelica

Dronovi i ostale bespilotne letjelice predstavljaju novu tehnologiju u zamahu. Dron u doslovnom prijevodu znači trut (muška jedinka kod pčela). Takav naziv im je dodijeljen prilikom razvoja prvih tipova letjelica tog tipa koje su imale glasne motore i zaključane rute leta.

Integracija s GPS-om omogućava let na zadanoj ruti i kategoriziranje prikupljenih podataka (**Slika 9**). Napredak u proizvodnji sve manjih i naprednijih uređaja za snimanje i detekciju olakšao je njihovu ugradnju u dronove i ostale bespilotne letjelice.



*Slika 9. Dron s instaliranim kamerom i GPS sustavom navođenja ([www.eagleview.com](http://www.eagleview.com))*

➤ Senzori za detekciju istjecanja prirodnog plina i termo kamere

Razvoj senzora za detekciju istjecanja prirodnog plina i termo kamere predstavljaju posebnu granu razvoja u svrhu rane detekcije potrebe za korektivnim održavanjem. **Slika 10** prikazuje toplinsku snimku termo sifona. Vidljivo je da termo sifoni s lijeve strane ne funkcioniraju ispravno i da ih je potrebno servisirati.

**Slika 11** prikazuje let drona s detektorom istjecanja prirodnog plina na ruti plinovoda. Zelena zraka simbolizira rad senzor za detekciju.



**Slika 10. Termo sifoni snimljeni termo kamerom**  
([www.flyroutine.com](http://www.flyroutine.com))



**Slika 11. Dron s detektorom istjecanja prirodnog plina**  
([www.flyroutine.com](http://www.flyroutine.com))

## 7. ZAKLJUČAK

UAS-i nisu novi fenomen jer datiraju iz sredine 18. stoljeća, ali njihov razvoj na civilnom tržištu relativno je nov. Do prije nekoliko godina, UAS se razvijao i koristio gotovo isključivo u vojnem sektoru. Postoji veliki potencijal za razvoj inovativnih aplikacija, koje su sada prepoznate i u civilnom sektoru, u smislu obavljanja korisnih zadataka i stvaranja novih radnih mesta. UAS se brzo širi širom svijeta, a koristi se na različitim područjima kao što su: energetika, sigurnost, precizna poljoprivreda, inspekcija i nadzor infrastrukture, praćenje prirodnih resursa, usklađenost s okolišem, atmosfersko istraživanje, mediji i zabava, sportske fotografije, zaštita i istraživanja divljih životinja, potrage i spašavanje, itd. Veličina, konfiguracija i složenost UAS-a također su vrlo raznovrsni i odgovaraju različitim vrstama operacija i korisnika. Dizajnirani su i proizvedeni ne samo klasičnim zrakoplovnim tvrtkama već i drugima, u mnogim slučajevima malim i srednjim poduzećima.

Gledajući evoluciju UAS-a za razdoblje od 2015. do 2020. godine, opisano u svjetskom istraživanju tržišta koja se usredotočuje na UAS ispod 25 kg, čini se da mediji i zabava čine najveći tržišni udio sa složenom godišnjom stopom rasta od oko 26 %. Prema predviđanjima za 2020. godinu, mediji i zabava mogli bi biti na vrhu popisa, nakon čega slijedi inspekcija / praćenje i preciznost poljoprivrede.

Okvirne prognoze do 2050. godine za razvoj UAS-a u EU:

- Europa je rastući UAS tržište s potencijalom; Europska potražnja može premašiti nominalno 10 milijardi eura godišnje za 2035. godinu i 15 milijardi eura do 2050. godine.
- Neizravni makroekonomski i društveni potencijali UAS industrije koje treba razmotriti:
  - povećanje uspjeha pretraga i spašavanja (SAR),
  - smanjenje kemikalija koje utječu na prirodno okruženje kroz preciznu poljoprivrednu i
  - razvojni programeri softvera za izradu aplikacija za UAS.
- Utjecaj industrije UAS na tržište rada može biti stvaranje dodatnih 250 000-400 000 radnih mesta.
- Očekuje se da će oko 7 milijuna potrošača u slobodno vrijeme UAS-a djelovati diljem Europe, a očekuje se da će 2050. godine flote od 400 000 koristiti za komercijalne i vladine misije.
- Dugoročno, veće komercijalne UAS postupno se očekuje da budu opremljene početnim verzijama opcionalno pilotiranih sustava, procijenjenih neko vrijeme nakon 2030. godine, prvo utječući na transport tereta, a zatim polako kretati prema prijevozu putnika. Uvodljivost takvih rješenja zahtijevat će značajno prihvaćanje društva, kao i niz kritičnih napretka u tehnologiji i regulaciji.
- Postoje novi zrakoplovni akteri, uključujući nove pothvate i industrijske vođe s obzirom na korištenje UAS-a za svoje poslovanje.
- UAS tehnologija podržava razvoj novih rješenja, kao što je pružanje komunikacijskog pristupa ili energije vjetra pomoću UAS priključenog na tlo.

Autori smatraju da će buduće istraživanje i razvoj identificirati nove tehnologije i operacije, što opravdava potrebu za propisima utemeljenim na rezultatima. UAS tržište se brzo razvija ne samo u pogledu aktivnosti u slobodno vrijeme, već i za vladine, komercijalne i vojne svrhe. Osim toga, uključuje aktere koji su novi u zrakoplovnom sektoru. Takav brzi razvoj djeluje na tehnologije kartiranja i nadzora plinovoda a novi zakonodavni okvir na nivou EU omogućit će stvaranje jedinstvenog tržišta novih usluga.

U današnjem globaliziranom svijetu, plin nedvojbeno igra vrlo važnu ulogu, te upravo i nadzor i kontrola nad transportom ovog strateškog resursa predstavlja vrlo bitan element na geostrateškoj šahovskoj ploči. Naime, ključni čimbenik u širenju plina u nove gospodarske sektore je upravo razvoj plinske transportne mreže. Uvažavajući činjenicu da se oko tri četvrtine svjetskih energetskih resursa prirodnog plina nalazi na udaljenim i

ne rijetko zabačenim područjima, daleko od krajnjih kupaca, te da bi se ova vrsta energetika transportirala na ciljana tržišta, koriste se mreže cjevovoda velikih promjera (cjevovodni sustavi velikog kapaciteta). Kako bi se smanjili troškovi izrade ovog tipa cjevovoda, teži se ka izradi što većih promjera i što tanjih stijenki od materijala visoke čvrstoće, čime se smanjuje iznos cijene po jedinici transportiranog plina.

U proteklih trideset godina, razvoj novih materijala i tehnologija proizvodnje značajno je pridonio sigurnosti instaliranih cjevovoda na globalnoj razini. Do danas je instalirano stotine tisuća kilometara cjevovoda za transport prirodnog plina, a zabilježen je tek mali postotak oštećenja s obzirom na ukupnu instaliranu duljinu. Pri tome je važno naglasiti da je najčešći uzrok havarija cjevovoda u eksploraciji nastao kao posljedica vanjska sila i korozija.

Pogleda li se razvoj bespilotnih letjelica unatrag 20-ak godina, vidi se da se mnogo postiglo na području bespilotnih zrakoplova. Vojne bespilotne letjelice su prenamjenjeni i koriste se u civilne svrhe. Veliki je potencijal bespilotnih zrakoplova zbog opsega poslova koje mogu obavljati bolje i efikasnije od čovjeka. Odrađujući poslove nadzora plinovoda može se pravovremeno spriječiti ilegalna gradnja unutar zaštićenog pojasa, rano detektirati razne faktore rizika, uštedjeti na poslovima nadzora i prevenirati neželjene posljedice.

U Republici Hrvatskoj po mišljenju autora nedvojbeno je da bespilotni zrakoplovi imaju budućnost, ali ne bez prave i učinkovite regulacije. Ulaskom Republike Hrvatske u EU, velik potencijal korištenja bespilotnih letjelica je u nadzoru. Uvažavajući navedeno, autori ovog rada mišljenja su da poslovni subjekti u Republici Hrvatskoj imaju potencijal za korištenje bespilotnih zrakoplova, koji trenutno nije dovoljno iskorišten. S tim u svezi, u vremenskom horizontu promatranja od 10-tak godina realno je očekivati da će trendovi tehnologije nadzora plinovoda i zaštitnog pojasa ići upravo u smjeru korištenja bespilotnih letjelica.

Upravo zbog toga, vrlo je važno vođenje aktivne, gospodarski orijentirane poduzetničke politike, jer energetika, odnosno ovaj u radu razmatrani „mali“ segment trendova nadzora plinovodnog i zaštitnog pojasa, nedvojbeno pruža posebne prilike onim sudionicima koji jasno definiraju svoju poziciju i interes te ih dosljedno i bez odlaganja provode ostvarujući na taj način svoj mogući gospodarski rast kao i dugoročnu primjenu pozitivnog načela u funkcioniranju i primjeni prihvaćenih tehnologija i razvoja energetskog sustava.

## 8. LITERATURA

ALS Global - Official Site - [www.alsglobal.com](http://www.alsglobal.com) (2018-04-05)

Bolanča A (2016): Osiguravanje kvalitete izgradnje i održavanja plinskog transportnog sustava, završni rad poslijediplomskog specijalističkog studija Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 242-260.

Bolanča A & Pavlović D (2016): Nova tehnološka rješenja u kartiranju i nadzoru trase plinovoda, Zbornik sažetka radova 31. međunarodnih znanstvenostručnih susreta stručnjaka za plin, Opatija, 3-12.

Bolanča A & Pavlović D (2016): Dronovi i bespilotne letjelice za nadzor plinovoda - "oko na nebu" bdije i nad sigurnom opskrbom plinom, EGE- energetika, gospodarstvo, ekologija, etika, broj: 4/2016, 93-94.

Communication from the commission to the european parliament and the council, Opening the aviation market to the civil use of remotely piloted aircraft systems in a safe and sustainable manner, European Commission, Brussels, 8.4.2014 COM(2014) 207 final

EagleView US - Official Site - [www.eagleview.com](http://www.eagleview.com) (2018-04-05)

Engineer Live, Engineering news, opinion and product reports for engineers - [www.engineerlive.com](http://www.engineerlive.com) (2018-04-05)

European Aviation Safety Agency Opinion No 01/2018

European Aviation Safety Agency Notice of Proposed Amendment 2017-05 (B)

First ever drone based gas pipeline surveillance program in France - [www.pipeline-journal.net/news/first-ever-drone-basedgas-pipeline-surveillanceprogram-france](http://www.pipeline-journal.net/news/first-ever-drone-basedgas-pipeline-surveillanceprogram-france) (2018-04-05)

Karasalihović Sedlar, D., Hrnčević, L., Brkić, V. (2010): Utjecaj proizvodnje plina iz nekonvencionalnih ležišta na ponudu i potražnju za ukapljenim prirodnim plinom, The Mining-Geological-Petroleum Engineering Bulletin, 22, 37-47.

Narodne novine (2015): Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova, Br. 49. od 6. svibnja 2015. godine.

Pavlović D (2011): Optimizacija plinskog sustava Republike Hrvatske integriranjem terminala za ukapljeni prirodni plin, doktorska disertacija Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 23-62.

Pictometry Login - EagleView US - [www.pictometry.com](http://www.pictometry.com) (2018-04-05)

PLINACRO d.o.o.; interna dokumentacija

# KVANTIFIKACIJA INDICIRANOG GEOTERMALNOG POTENCIJALA RH ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

## QUANTIFICATION OF INDICATED GEOTHERMAL RESOURCES IN CROATIA FOR ELECTRICITY PRODUCTION

Slobodan Kolbah <sup>1\*</sup>, Mladen Škrlec <sup>1</sup>, Miroslav Golub <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geotermalna energija d.o.o., Luke Ibrišimovića 9, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

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

**Sažetak:** Geotermalna energija Hrvatske nedovoljno je poznata i korištena. Iako obnovljiv izvor energije i mogući pokretač održivog razvoja, nije na prihvatljiv način valorizirana ni korištena. Izdvajanjem i definiranjem novih istražnih prostora (IP): M. Bukovca, Legrad-1, Kotoriba, Ferdinandovac-1 i revizijom eksploracijskog polja (EP): Lunjkovac-Kutnjak, procijenjena je njihova moguća instalirana snaga na 100 MW<sub>e</sub> električne energije, što je oko 2,5% postojećih kapaciteta u RH ili 29% hrvatskog dijela nuklearne elektrane Krško. Uz to, iz tih postrojenja kogeneracijom se može dobiti i 500 MW<sub>t</sub> toplinske energije. Ovu procjenu omogućila su geološko-geofizička istraživanja i proizvodnja ugljikovodika te 4000 izrađenih bušotina u Hrvatskoj. Time su i indicirana, relativno lako dostupna hidro-geotermalna ležišta (do 1500 m dubine), gdje se na 500 lokacija (prema postojećem iskustvu), može očekivati korištenje instalirane snage od 750 do 1300 MW<sub>t</sub> toplinske energije. Prema dosadašnjim iskustvima, na većini ovih lokacija (njih 400), moguće je godišnje pridobiti više od  $200 \times 10^6 \text{ m}^3$  nekonvencionalnih rezervi prirodnog plina, otopljenog u geotermalnoj vodi, što predstavlja 5% godišnje potrošnje prirodnog plina u Hrvatskoj. Ove vrlo konzervativne procjene, iz uzorka koji je tek dio najbolje poznatih objekata, upućuje na vrlo ozbiljnu mogućnost supstitucije domaće toplinarske energije na razini 12-26% godišnje potrošnje prirodnog plina u RH (2014). Pored proizvodnje na geotermalnim poljima, ona je moguća i na većini starih naftno-plinskih polja gdje s nastavkom intenzivnog crpljenja geotermalne vode, može pridobiti dodatne količine ugljikovodika, što nije uključeno u ova razmatranja.

**Ključne riječi:** hidro-geotermalna energija, električna i toplinska energija, kvantifikacija, Hrvatska, Panonski bazen.

**Abstract:** Geothermal energy in Croatia is not well recognized and used, although it is renewable and a possible driver of sustainable-development, it is not appropriately valued. By delineating and defining new exploration-blocks: M. Bukovac, Legrad-1, Kotoriba, Ferdinandovac-1 and the revision of the field: Lunjkovac-Kutnjak, an estimated capacity of 100MWe of electrical power is proposed, 2.5% of the present country capacity or 29 % of the Croatian part of NPP-Krško, where an additional 500 MWt heat in co-generation can be obtained. The next assessment was possible from the analyses of geological-geophysical activities done for hydrocarbon E&P, including 4000 wells. This indicated relatively easily accessible hydro-geothermal fields, up to 1500 m deep. On the first 500 locations / fields it is expected to achieve an installed-capacity of 750 - 1300 MW<sub>t</sub> of heat. On most of these fields (400), it is possible a yearly production greater than  $200 \times 10^6 \text{ m}^3$  of non-conventional aquifer-gas, or 5% of annual consumption of natural-gas in Croatia. These conservative assessments, were done from a sample of the best-known objects, and it alludes to the very serious domestic heating substitution by 12-26% of yearly gas consumption in Croatia (2014). And this is only the tip of the iceberg. A possible boost of recoverable quantities of hydrocarbons is possible from existing oil & gas fields, in parallel with geothermal energy production, which was not discussed here.

**Keywords:** hydro-geothermal energy, electrical and thermal energy, quantification, Croatia, Pannnonian basins.

Received: 16.07.2018. / Accepted: 04.08.2018.

Published online: 17.12.2018.

Pregledni rad / Review paper

### 1. UVOD

Navedeni dio resursa geotermalne energije u Hrvatskoj, KVANTITATIVNO je utvrđen mogućom instaliranim snagom za proizvodnju električne energije, a preostali dio pogodan za izravno korištenje topline s instaliranim kapacitetima i uspoređen mogućnošću supstitucije godišnje potrošnje prirodnog plina. Procijenjeno je i očekivano pridobivanje nekonvencionalnih resursa u geotermalnoj vodi otopljenog plina. Od prve stručne procjene (Bošnjak 1998), ova procjena, iako konzervativna, je dvostruko veća te upućuje na mogućnost postajanja značajnih resursa u energetskoj balanci zemlje. Aktiviranjem resursa nekonvencionalnih rezervi plina moguće je osigurati 12-26 % sadašnje potrošnje plina iz konvencionalnih ležišta. Uz to, ukoliko se aktivira proizvodnja električne energije iz geotermalnih izvora, može se osigurati oko 2,5% postojećih kapaciteta elektrana u zemlji ili 29 % NE Krško.

KVALITATIVNE prednosti, kao što su: stabilnost i neovisnost proizvodnje, obnovljivost energetskih izvora, očuvanje okoliša te održivi razvoj nisu posebno razmatrane.

Geotermalni resursi su zanemareni na prirodnim termalnim izvorištima, gdje su na dohvat ruke i ne zahtijevaju visoka početna ulaganja kao na dubokim buštinama razrađenih geotermalnih polja. Stoga, ne čudi da je interes za potencijalom kojeg želimo promovirati potpuno nepriličan. Nasuprot tome su pojedinačni izuzetci s vrlo isplativim privatnim ulaganjem u toplinarstvo i ulaganjem u proizvodnju električne struje, u nadi za državnim poticajima, no, s početkom njihove proizvodnje očekujemo uvid u pravu atraktivnost ovih projekata.

## 2. GEOLOŠKE PRETPOSTAVKE

Ležimo uz globalnu zonu intenzivnijeg geotermalnog pritoka, a geološka građa omogućuje formiranje ležišta za njegovo akumuliranje u dubokim vodnim tijelima (DVT) (Deep Water Bodies - DWB), pogodnih za proizvodnju struje i direktno-korištenje / toplinarstvo.

Za razliku od konsolidiranih kontinentalnih prostora, gdje je geotermalni pritok oko  $50 \text{ mW/m}^2$  (Hurtig 1992), u razmatrаниm Panonskim bazenima je veći i kreće se od 80 do  $100 \text{ mW/m}^2$ . Kako se stanjuje Zemljina kora, povećava se vrijednost geotermalnog pritoka prema površini. Još veće vrijednosti pratimo sa stanjenjem kore, ali i nepostojanjem ili s tankim bazenskim pokrovom na susjednim dijelovima Balkana i dalje prema Maloj Aziji ili pak Toskani. No, geotermalna ležišta su tamo drugačija.

NESTABILNA kora podno Panonskih bazena posljedica je stanjenja zemljine kore i regionalnog povećanja geotermalnog dotoka, uslijed poboljšanog provođenja topline - KONDUKCIJE kroz Litosferu. Prema istraživanjima (Mohorovičić 1910; Dragašević & Andrić 1982; Šumanovac et al. 2009) dubina Moho diskontinuiteta (granice plašta i litosfere) ovdje je smanjena od 30 do 22 km, što je znatno manje od one na konsolidiranim kopnima - KRATONIMA ( $>35$  Češka,  $>40$  Skandinavija...) ili do najvećih zadebljanja u OROGENIM zonama (od 45 km u Dinaridima do više od 50 km na prostoru sjevernog Urala). Na prostoru Dinarida, gdje je toplinska kondukcija zbog povećanog zadebljanja kore, ograničena svjedoci smo pojačanih geotermalnih dotoka zahvaljujući konvekciji vode duž dubokih tektonskih poremećaja.

Isto tako, na širim Panonskim prostorima geotermalni pritok može se dodatno pojačati i KONVEKCIJOM, odnosno masovnim uzlaznim kretanjima molekula fluida. Primjerice, u geotermalnim akumulacijama "dubokim vodnim tijelima" (DVT). Ova rezervoarska tijela, ekranizirana su s izolirajućim naslagama tercijarnih sedimentnih bazena. Najznačajnija duboka vodna tijela formiraju se u masivnim RAZLOMLJINIM krtim karbonatnim stijenama ispod ili unutar pokrova tercijarnih izolirajućih naslaga.

Sljedeća skupina vodnih tijela po važnosti su ona s MEĐUZRNIM pornim prostorom, podno i unutar tercijarnih bazena. Za korištenje geotermalnih resursa tu su posebice zanimljivi intergranularni rezervoari koji još nisu dovoljno konsolidirani i petrificirani, što omogućuje zadovoljavajuće skladištenje i protočnost, a uobičajeno zaliježu u pličim dijelovima bazena.

S novijim istraživanjima uočena je i važnost recentnog tektonskog stresa koji omogućuje otvorene protočnosti prostora u pukotini. Ovi hidrodinamski koridori važni u raspucanim vodonosnicima, mogu se javljati i unutar plastičnih-izolatorskih bazenskih sedimenata.

U najplićim - hidrogeološkim zonama pojave geotermalnih ležišta ovisna je o balansu KONVEKCIJE hidrogeotermi i PONIRANJA hladnjih-oborinskih voda kojima se stvara zanimljiv dinamički odnos ovih hidrodinamskih sistema, s povremenom neuobičajenom pojavom termi u vremenu i prostoru gdje ih se ne bi očekivalo.

U mnogo većim dubinskim odnosima slični su odnosi s jugozapadne strane Dinarske-karbonatne platforme, duž njenog ruba s Jadranskim bazenima. Pratimo ih s geotermalnim izvorom na sjeveru Istre i s povremeno pojačanim geotermalnim pritocima duž jugozapadnog ruba našeg kontinentalnog šelfa i u južnom Jadranu. Indikacije subermalnih i mineralnih izvora imamo na: Krku i Dalmaciji (Splitu, Sinju, Omišu, Mokošica - Rijeka Dubrovačka ...) i hipertermalne zone u bušotini Poljica-1. O mogućnosti geotermalnih ležišta svjedoči akumulacija plinova u bušotini Brač-1. Te pojave su vezane uz tektonske sisteme i njihove ekranizacije, čime bi specifična duboka vodna tijela s geotermalnim akumulacijama bila moguća i u ovim „hladnim“ dijelovima Hrvatske. Nastavak istraživanja ugljikovodika općenito a posebno u Dinaridima i Jadranu mogao bi dati više odgovora na ta pitanja.

Najperspektivniji prostori za korištenje geotermalne energije i gospodarenje DVT su zasad ipak „vrući“ Panonski prostori. Možda je ovo izlaganje prilika da proširimo trans-granični projekt započet još 2006., gdje su naznačena važnija geotermalna DVT Hrvatske duž Mađarske granice (Kolbah 2010). Tada su izdvojene dvije osnovne vrste vodonosnika: oni u rezervoarima sa sekundarnim pukotinskim i kavernoznim šupljinama pretežno karbonatne građe ili tzv. krški i oni u tzv. poroznim vodonosnicima s primarnom intergranularnom šupljikavošću u konglomeratima, pješčenjacima i pijescima (Slika 1). Tada je izdvojeno sedam geotermalnih DVT u Hrvatskoj, četiri su prekogranična. Prostrana geotermalna DVT HR\_kt. 3. 1 / HU\_kt. 1. 7 čine dio južnih vapnenih Alpi utočnula pod tercijarne naslage i zauzimaju prostrane dijelove sjeverne Hrvatske i dalje se pružaju u Mađarsku južno od Balatona.

Sljedeće krško geotermalno DVT HR\_kt. 3. 2 je karbonatni plato Gola-Ferdinandovac i susjedna dublje utočnula struktura Molve-Kalinovac-Stari Gradec. Plato i struktura su prekriveni

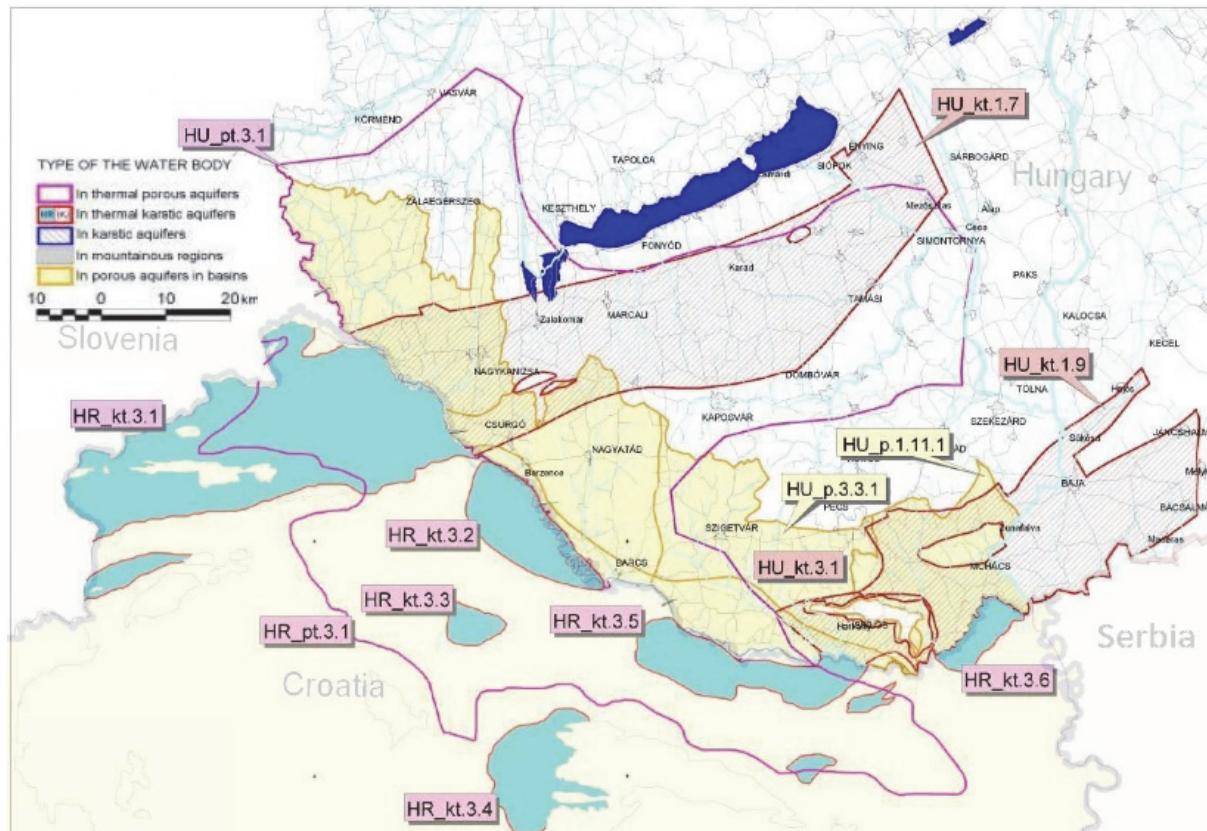
tercijarnim naslagama i nije utvrđeno da li se prostiru preko granice.

Nadalje, vrlo su zanimljiva karbonatna geotermalna DVT HR\_kt. 3. 3 ispod tercijara Bjelovarskih bazena i Bilogore. Ona je u skorije vrijeme pripremaju za proizvodnju i detaljnije su istražena.

Krška geotermalna DVT HR\_kt. 3. 4 čine moćno karbonatno predgorje Slavonskih planina koji su pokriveni relativno tankim tercijarnim pokrovom, a prema istoku se pojavljuju njihovi izdanci i imaju važne termalne izvore Daruvar, Lipik i Velika. Krška geotermalna DVT HR\_kt. 3. 5. i 6. ponovo su u glavnom Dravskom bazenu i to ponekad na vrlo dubokim dijelovima središnjih i istočnih dijelova Dravskog bazena.

Osim u mezozoiskim karbonatnim razvojima, nalazimo i značajne razvoje karbonatnih breča tercijarne starosti. Istraživanjima nafte i plina potvrđen je njihov trans-granični karakter te se pružaju dalje u Mađarsku, gdje ova trans-granična krška geotermalna DVT HU\_kt. 3. 1 i 1. 9 imaju izdanke prema sjeveru te imaju važne termalne izvore kod Harkanjia.

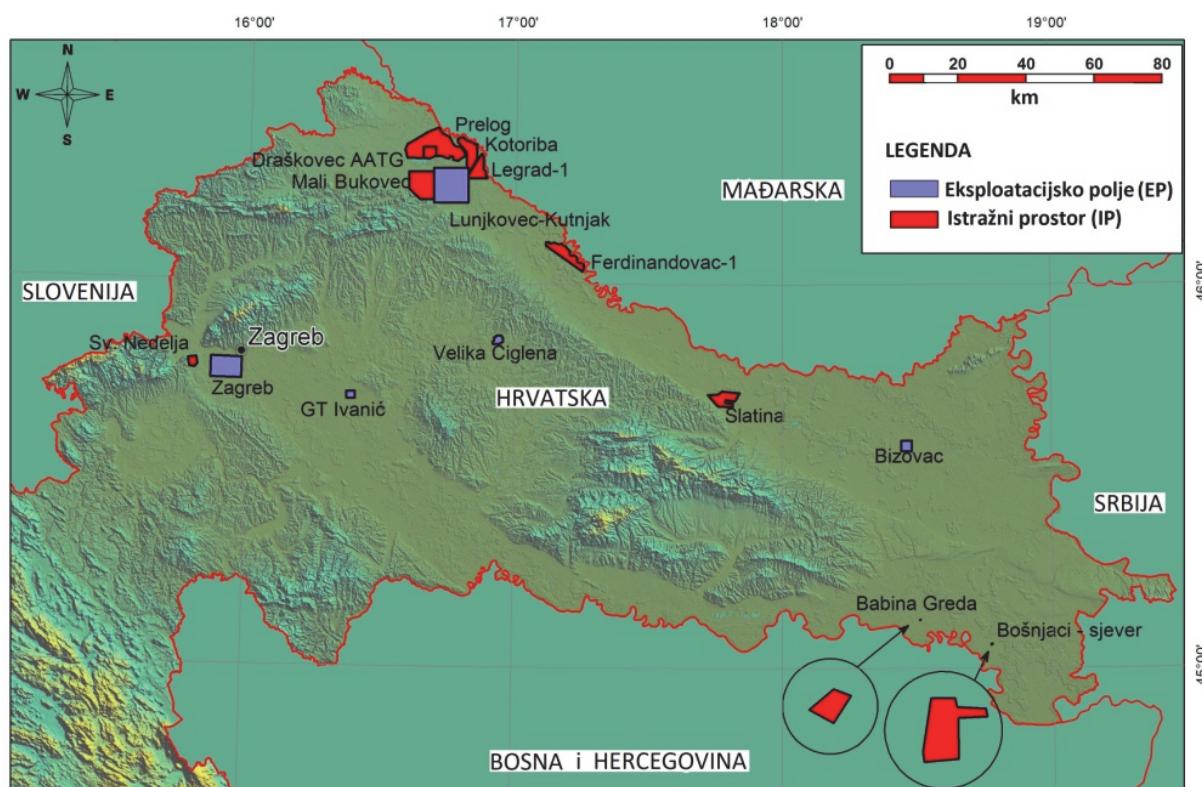
Trans-granično porozno geotermalno DVT Dravskih tercijarnih bazena - HR / HU\_pt. 3. 1 obuhvaća glavne dijelove ovih bazena s nizom hidrodinamsko odvojenih pjenih tercijarnih bazenu - HR / HU\_pt. 3. 1 obuhvaonekad na vrlo dubokim dijelovima sredozmarnih izoliraju termalna lee Dugim riječima, saznanja o ovim važnim dubokim tijelima postepeno se proširuju i prekogranična suradnja te je time još važnija i korisnija za sve sudionike.



*Slika 1. Duboka vodna tijela (DVT) od kojih su neka trans-graničnog karaktera duž Hrvatsko Mađarske granice. Legenda: 1. Puna linija ograničava „porozna“ DVT, 2. Siva boja označava „krška“ DVT (prema: Kolbah 2010)*

### 3. ATRAKTIVNOST POČETNIH KVANTITATIVNIH POKAZATELJA

Korištenje geotermalnih izvora i upotrebljivih bušotina - ostavština naftne industrije (**Slika 2** i **Tablica 1**) je katastrofalno loše. Primjerice, od dokazanih potencijala Topuskog koristi se 15-30% s vrlo malim iskorištenjem. Istodobno, 8 puta manji potencijal Bošnjaka zadovoljava 4 ha plastenika (**Slika 7**) ili od stotinjak za korištenje geotermalne energije izrađenih ili pripremljenih bušotina radi 5 s minimalnim iskorištenjem.



*Slika 2. Poznati izvori geotermalnih voda, u toplicama i dubokim bušotinama.  
Legenda: Pridobive temperature geotermalne vode (prema: Živković et al. 2015)*

Tablica 1. Osnovni potencijal toplica i bušotina u RH (prema: Živković et al. 2015)

Lokalitet	Naziv bušotine /toplica	Vrsta uporabe	Dotok [kg/s]	Temperatura vode na ušcu bušotine
Velika (Požega)		B	35,0	25,0
Sveta Jana (Jastrebarsko)	SvJ - 1	B	53,0	26,0
Livade (Istarske toplice)		B	2,0	28,0
Šmidhen (Samobor)	Sa - 2	B	19,7	29,2
Lešće	Lsc - 1	B	6,2	30,7
Tuhelj	Tuh - 1	B	85,0	32,9
Sutinske toplice (Zlatar)	Sut - 3	B	80,0	33,8
Jezerčica (G. Stubica)	Jez - 1	B	10,0	38,4
Zelina	Ze - 1	B	30,0	40,0
Krapinske toplice	KrT - 1	HB	81,6	40,7
Daruvarske toplice		B	21,0	42,6
Stubičke toplice		HB	95,0	53,4
Varaždinske toplice		HB	95,0	57,6
Lipik		HB	23,0	58,7
Topusko	TEB - 4	HB	151,0	66,6
Vrtnjakovec (Krapinske t)	Vrt - 1	G	10,0	45,0
Lučko (GTP Zagreb)	Luč - 1	H	2,0	50,0
Naftalan (GTP Ivanić Grad)	Iva - 2	B	3,0	60,0
Sveta Nedjelja	N- 1	G	25,0	63,0
Bošnjaci	Boš - 1	G	20,0	65,0
Mladost (GTP Zagreb)	Mla - 3	HB	12,0	80,0
Sveuč. bol. (GTP Zagreb)	SBNZ - 1B	H	65,0	80,0
Bizovac (GTP Bizovac)	Biz - 4	HB	6,0	85,0

**VRSTA UPORABE**  
**H** = Grijanje prostora  
**B** = Balneologija      **Kupanje**  
**G** = Staklenici      **Toplinarstvo**

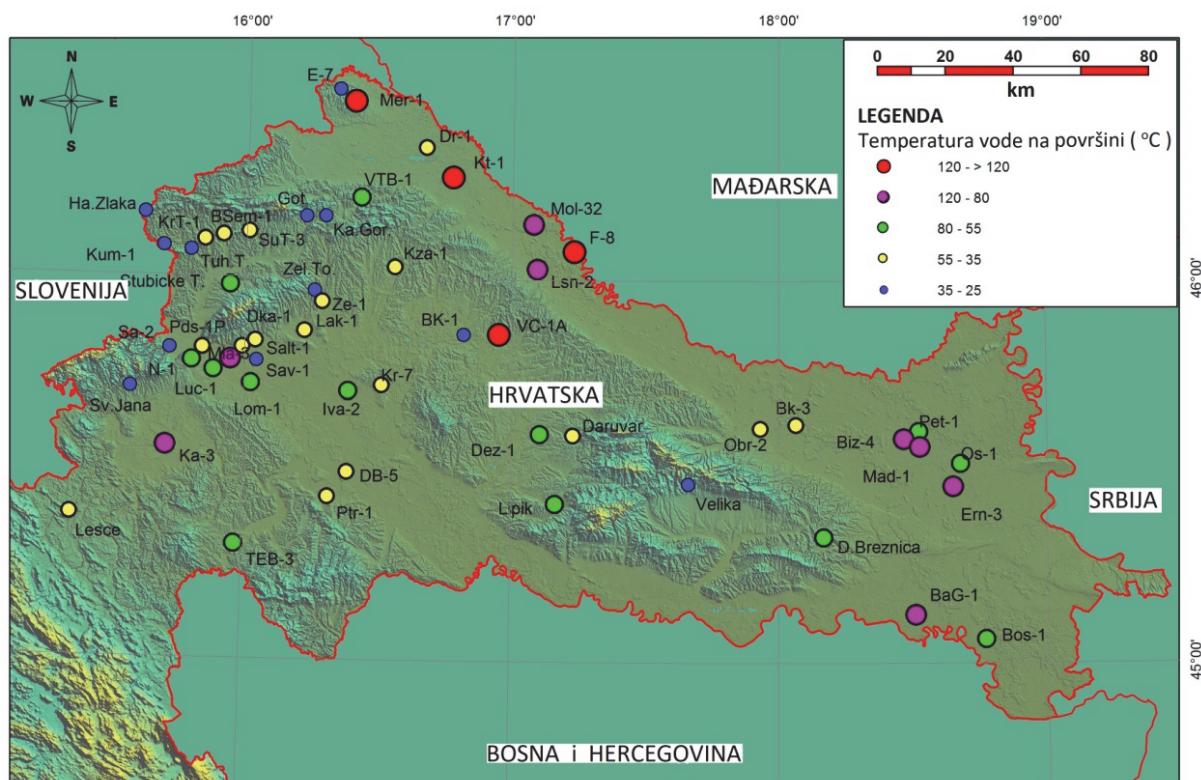
Tablica 2. Eksplotacijska geotermalna polja u RH (nadopunjeno: Živković et al. 2015)

DODJELJENA GEOTERMALNA POLJA - EP	BROJ BUŠOTINA	OVLAŠTENICI GEOTERMALNIH POLJA
GTP ZAGREB	3	GPC. Instrumentation process d.o.o.
GTP BIZOVAC	2	INA d.d.
GTP IVANIĆ	0	INA d.d.
GTP KUTNJAK - LUNJKOVEC	2	MB GEOTHERMAL d.o.o.
GTP VELIKA CIGLENA	4	MB GEOTHERMAL d.o.o.
GTP DRAŠKOVEC	2	AAT GEOTHERMAED d. o. o.

Tablica 3. Osnovni potencijal toplica i bušotina u RH (prema: Živković et al. 2015)

ODOBRENI ISTRAŽNI PROSTOR - IP	OVLAŠTENICI
BOŠNJACI - SJEVER	RURIS d.o.o.
BABINA GREDA	RH
FERDINANDOVAC - 1	MB GEOTHERMAL d.o.o.
LEGRAD – 1	MB GEOTHERMAL d.o.o.
MALI BUKOVEC	RH
KOTORIBA	MB GEOTHERMAL d.o.o.
PODRAVSKA SLATINA	RH.
PRELOG	RH
SVETA NEDJELJA	PLODOVI d.o.o.

Da se ipak nešto kreće svjedoče aktivnosti na desetak odobrenih istražno-proizvodnih geotermalnih polja (Tablica 1, Tablica 2 i Tablica 3) ali i ulaganja kojim bi se nakon toliko godina nezainteresiranosti „razbio led“ i omogućila proizvodnja električne energije u Hrvatskoj. To se očekuje na geotermalnom polju za proizvodnju struje Velika Ciglena (Slika 4.), koje je otkrila INA 1990 godine i razradila s gotovo 80% podzemnih rudarstvo ulaganja (4 bušotine, 2 ispitane).

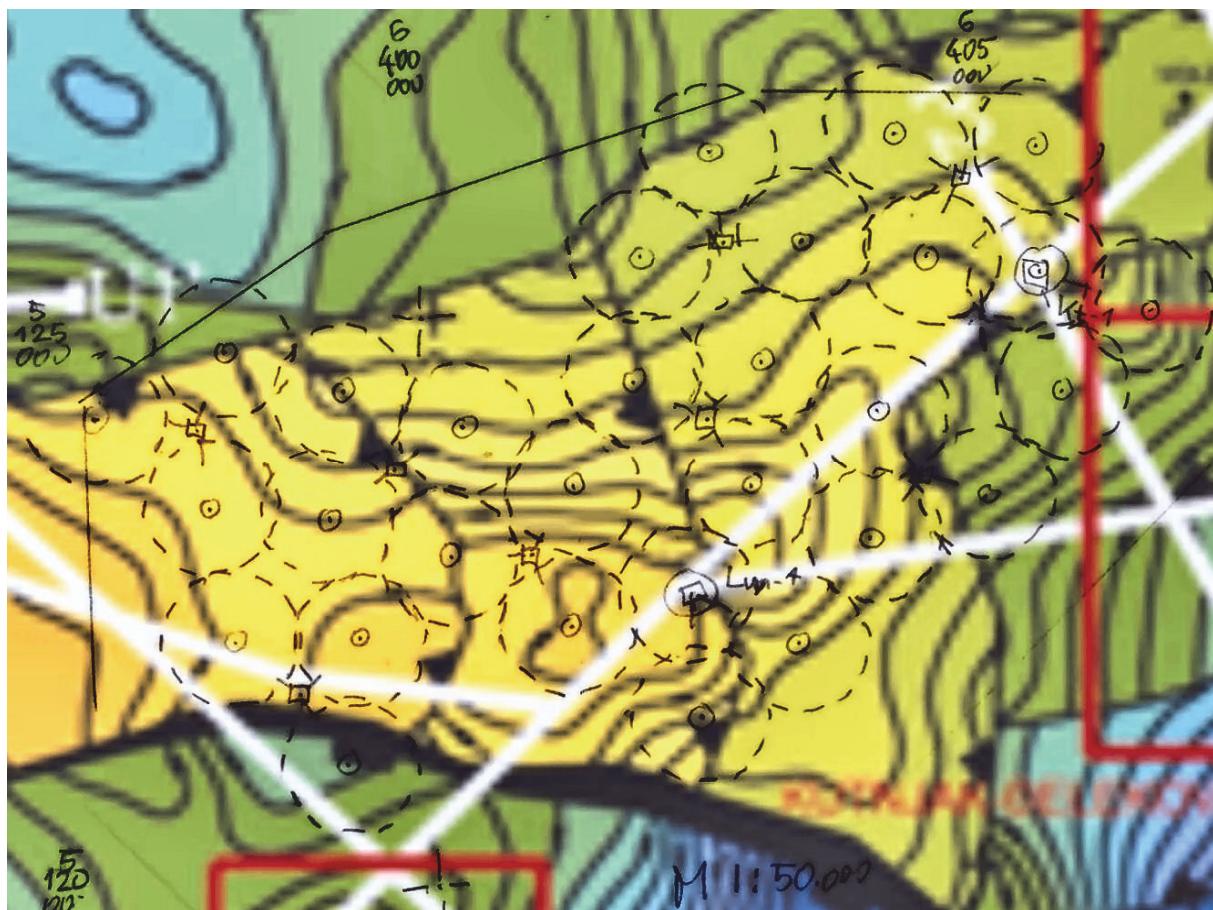


Slika 3. Dodijeljena geotermalna polja - (EP) i odobreni istražni prostori (IP) (prema: Živković et al. 2015).



*Slika 4. Proizvodno ispitivanje MB Geothermal-a na geotermalnom polju Velika Ciglena 2015.*

Za proizvodnju struje na EP;: Lunjkovec–Kutnjak i IP: Mali Bukovec, Legrad-1, Kotoriba i Ferdinandovac-1, konzervativnom procjenom očekujemo dalnjih 100 MW<sub>e</sub> instalirane snage ili gotovo 2,5% postojećih elektrana u Hrvatskoj odnosno 29% nuklearne elektrane Krško. Tu se suvremenim tehnologijama može ekonomično proizvoditi struju iz geotermalne vode s prosječnim dotokom 100 l/sec i temperaturom >140 °C, odnosno na izlazu 80 °C koja u kogeneraciji daje 500 MW<sub>t</sub> za toplinarstvo.



*Slika 5. Shema podzemne razrade na primjeru djela EPi Lunjkovec-Kutnjak.*

*Legenda: 1. crtkani krugovi - drenažni radijusi u ležištu, 2. kvadratići - zajednički površinski položaj ušća usmjerenih bušotina (grmovi)*

Na eksploracijskom polju u istraživanju (EP<sub>i</sub>) Lunjkovec-Kutnjak kao i na 4 istražna prostora (IP), prema geološkim, geotermalnim i hidrodinamskim značajkama predviđena su podzemna razradna ležišta (**Slika 4**) kao osnova matrice ukupnih parametara proračuna. Ovom relativno detaljnom, cjelovitom, ali i konzervativnom procjenom korišteno je 8-16 proizvodnih parova na pojedinom EP<sub>i</sub> /IP ili ukupno pedesetak kao ključni element racionalnog rudarenja i ulaganja.

Kvalitativna vrijednost električne energije iz geotermalnih izvora u usporedbi s porastom udjela vjetroelektrana, koje višestruko premašuje našu procjenu, ni izdaleka nije tako vrijedan obnovljivi energet. Geotermalne centrale nemaju potrebe za vrlo brzo uključive „back-up“ elektranama (plinske), pri hirovitim prestancima puhanja vjetra ili sličnim nepogodama. Kao i kod nuklearki, nakon zahtjevnih inicijalnih ulaganja, mogu imati vrlo stabilan režim rada uz niske troškove održavanja, ali bez zbrinjavanja nuklearnog otpada. Koriste ekološki čistu i obnovljivu energiju i stabilne su na geostrateške, finansijske i političke udarce.



*Slika 6. Hidrodinamsko ispitivanje na lokaciji buduće geotermalne-elektrane Draškovec*

Za razliku od termo-elektrana koje emitiraju „stakleničke plinove“ i ostala-onečišćenja ovdje to izostaje. Kako ova postrojenja nužno vraćaju korištene geotermalne vode u ležište, mogu zbrinjavati i stakleničke plinove iz tuđih izvora. Jedan takav projekt upravo se realizira na EP geotermalne vode „Draškovec“ gdje se planira izgradnja geotermalne elektrane (**Slika 6**).



*Slika 7. Od 1ha staklenika bušotinom Boš-1 omogućen je razvoj na >4ha i povećana konkurentnost na tržištu.*

*Legenda: 1. lijevo: nadzemni uredaj bušotine, separator prirodnog-plina i izmjenjivač topline, 2. u sredini i desno: staklenici s gradilištem narednog.*

Za razliku od proizvodnje struje, koja privlači kapital, direktna upotreba topline zahtjeva znatno niža ulaganja, zahvaljujući relativno maloj dubini bušenja (<1500 m) a geološko-finansijski rizik se često smanjuje zbog mogućeg usporednog pridobivanja ne-konvecionalnih resursa prirodnog plina. Rizik otkrivanja i izgradnje elektrana i toplinarstva, moguće je bitno smanjiti iskustvo intenzivnog istraživanje i proizvodnje ugljikovodika, geološko-geofizičkih radova i >4000 bušotina s brojnim ispitivanjima na razmatranim prostorima Hrvatske.

Analizom relativno malog uzorka na 500 lokacija, očekujemo instalaciju toplinske snage od 750 - 1300 MW, što bi u ogrevnoj sezoni zamijenilo 300 – 650 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> prirodnog-plina godišnje.

Nekonvencionalni resursi prirodnog plina otopljenog u vodi (aquifer-gas / Water-Dissolved-Gas - WDG) koji pridobivamo usporedno s geotermalnom vodom, na Bošnjacima, Draškovcu (**Slika 6 i Slika 7**) i mnogim drugim lokacijama, prema svjetskim i našim istraživanjima, smatraju se većim od rezervi konvencionalnih ležišta (**Tablica 4**). Od ukupnog broja lokacija za toplinarstvo, izdvojeno je 400 objekata iz kojih po konzervativnoj procjeni očekujemo >160 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> prirodnog plina ili >5% godišnje potrošnje u Hrvatskoj.

Tablica 4: Svjetske rezerve i resursi plina po vrstama, krajem 2008. ( $10^{12} \text{ m}^3$ )

Vrsta prirodnih plinova	Rezerve $10^{12} \text{ m}^3$	Resursi $10^{12} \text{ m}^3$	Ukupno $10^{12} \text{ m}^3$
<b>Konvencionalni prirodni plin</b>	<b>188</b>	<b>239</b>	<b>427</b>
<b>Nekonvencionalni prirodni plin</b>	<b>5</b>	<b>2 720</b>	<b>2 725</b>
- Plin iz plinskih škriljevac		456	456
- Plin iz ostalih gustih fm.	3	210	213
- Metan iz ležišta ugljena	2	254	256
- Otopljeni plin u vodi		800	800
- Plin iz metanskih hidrata		1 000	1 000

Izvor: DIW Berlin 2010

#### 4. ZAKLJUČAK

Da bi uputili na postojanje i važnost energetskog resursa geotermalne vode za proizvodnju električne struje i direktno korištenje - topline u Hrvatskoj, vrlo konzervativnom kvantifikacijom, ograničenom na utvrđene i najbolje poznate objekte, predviđen je vrlo ozbiljan udio u energetskoj bilanci zemlje. Već to bi omogućilo ozbiljniju i pouzdanoju supstituciju, električne struje sa 100 MWe instalirane snage, 1/3 hrvatskog dijela kapaciteta struje NE-Krško i u toplinarstvu koja ide prema trećini godišnje potrošnje prirodnog plina (2014.). Za proširenje ovog djela pouzdanje ali i konzervativno procijenjenog dijela energetskog potencijala geotermalne vode nužna je odgovarajuća analiza geološke grade i ostalih bitnih značajki geotermalnih dubokih vodnih tijela uz maksimalno korištenje saznanja geološko-geofizičkih i ostalih radova posebno na dubokim buštinama za istraživanje i proizvodnju nafte i plina.

Kao dva glavna elementa promjene danas nepovoljnog trenda u korištenju ovog nacionalnog resursa, vidimo kao potrebu:

- smanjenja ekonomskog rizika ulaganja u ove projekte i
  - maksimalno skraćenje administrativnih prepreka ulagačima,
- kako bi što prije iz ostvarenih prihoda mogli početi povrat vrlo visokih ulaganja na samom početku projekta u
- -geološko-geofizičke i geotermalno-hidrodinamske studije
  - -razradu ležišta dubokim bušenjem te izgradnju nadzemnih uređaja.

Sama geotermalna proizvodnja je vrlo je stabilna s niskim direktnim troškovima.

Kao vrlo mladoj i složenoj industrijskoj grani neophodna je interdisciplinarna suradnja s još uvijek prisutnim stručnjacima iz „Naftne“ industrije ali i potreba vrlo kritičnih provjera svih ključnih postavki na domaćem nivou i suočenja s svjetskim iskustvima.

#### 5. LITERATURA

- GRUPA autora 1998: Geoen - Program korištenja geotermalne energije - prethodni rezultati i ,buduće aktivnosti, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb.
- Dragašević T, Andrić B (1982): Information on the results of examination of earth crust composition by application of the DSS method in Yugoslavia, In Proceeding of the Yugoslav Geophysical Congress, 27-38, Skoplje.
- Hurtig E (1992): Geothermal atlas of Europe, Hermann Haach Verl.mbH, Gotha, Germany.
- Kolbah S (2010): Deep Transboundary Water-Bodies: Exploration & Management in the Pannonian Basin of the Republic of Croatia, ISARM2010 International Conference, 6-8 December 2010, Paris.
- Mohorovičić A (1910): Das bebenvon 8. X 1909, Jaresbuch des meterologischen observatorium in Agram, 9 (4), 1-56, Zagreb.
- Šumanovac F, Orešković J, Grad M & ALP (2002): Working Group 2009: Crustal structure at the contact of the Dinarides and Pannonian basin based on 2-D seismic and gravity interpretation of the Alp 07 profile in the ALP 2002 experiment, Geophys. J. Int., 179, 615-633.
- Worldwide gas reserves and (assumed) resources by type, at the end of 2008, DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung), Berlin. 2010.
- Živković S, Kolbah S, Golub M, Škrlec M (2015): Croatia Geothermal Resources Updates 2015 and On, Proceedings, WGC 2015, Melbourne, Australia.

# NUMERIČKO RJEŠAVANJE I VIZUALIZACIJA RJEŠENJA LAPLACEOVE JEDNADŽBE

## NUMERICAL SOLVING AND VISUALIZATION OF SOLUTION OF LAPLACE EQUATION

Filip Strelec<sup>1\*</sup>, Ivan Hip<sup>1</sup>, Igor Petrović<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

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

**Sažetak:** Laplaceova jednadžba odnosno mogućnost njenog brzog rješavanja i vizualizacije rješenja omogućuje uvid i interpretaciju podataka kroz širok spektar znanstvenih područja. U geoinženjerstvu Laplaceova jednadžba opisuje stacionarno tečenje vode u tlu. Rad opisuje Laplaceovu jednadžbu, njen rješavanje metodom konačnih razlika, implementaciju te metode u programski jezik JavaScript i vizualizaciju rješenja pomoći HTML5 elementa canvas. Program je temeljito testiran usporedbom dobivenih rezultata s analitičkim rješenjem i rješenjima drugih programske paketa. Zbog jednostavnog korisničkog sučelja, raznolikih mogućnosti vizualizacije i luke dostupnosti preko web preglednika program je prikladan za korištenje u edukativne svrhe.

**Ključne riječi:** Laplaceova jednadžba, metoda konačnih razlika, JavaScript, HTML5

**Abstract:** The ability to quickly solve and visualize solutions to Laplace equation enables insight and interpretation of data across a wide spectrum of scientific areas. In the field of geoengineering Laplace equation describes steady-state groundwater flow. This paper describes Laplace equation, its solution using the method of finite differences, an implementation of the method into the JavaScript programming language and visualization of the solution using the HTML5 canvas element. The program has been thoroughly tested by comparing the results with an analytical solution and solutions obtained by other software packages. The program is suitable for educational purposes because it has a simple user interface, a variety of visualization options and it can be run in any web browser.

**Keywords:** Laplace equation, finite difference method, JavaScript, HTML5

---

Received: 10.11.2018. / Accepted: 06.12.2018.

Published online: 17.12.2018.

---

Pregledni rad / Review paper

### 1. UVOD

Laplaceova jednadžba pojavljuje se u mnogim znanstvenim područjima, a zanimljiva je i u geoinženjerstvu jer opisuje stacionarno tečenje vode u tlu. Na primjer, tečenje vode kroz temeljno tlo brane, tečenje vode kroz nasutu branu, ili pak problem tečenja podzemne vode u građevnu jamu. U svim tim slučajevima, uslijed značajnih hidrauličkih gradijenata, može doći do pojave erozije tla ili čak i do hidrauličkog sloma kada tlo u potpunosti gubi svoju nosivost. Nadalje, rješenje Laplaceove jednadžbe osnovna je polazišna osnova za modeliranje pronosa zagađivala kroz tlo.

Ovaj rad predstavlja osvrt na završni rad studenta Filipa Streleca (Strelec 2018). Završni rad izrađen je na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, pod mentorstvom doc.dr.sc. Ivana Hipu i izv.prof.dr.sc. Igora Petrovića. Cilj rada bio je razviti računalni program koji rješava Laplaceovu jednadžbu i omogućava različite načine vizualizacije rješenja, a pritom je jednostavan za korištenje i može služiti u edukativne svrhe. Program koristi metodu konačnih razlika za rješavanje Laplaceove jednadžbe. Razvijen je u programskom jeziku JavaScript, a vizualizacija rješenja implementirana je u HTML5 elementu *canvas* kako bi program bio lako dostupan putem standardnog web preglednika.

Programski kod dostupan je na GitHub-u na adresi: [https://github.com/filip4428/Laplace\\_zavrsni\\_rad](https://github.com/filip4428/Laplace_zavrsni_rad), a program se može isprobati na adresi <https://filip4428.github.io/Laplace-zavrsni-rad/>.

### 2. LAPLACEOVA JEDNADŽBA

Laplaceova jednadžba je linearna homogena parcijalna diferencijalna jednadžba drugog reda koja se pojavljuje u mnogim znanstvenim područjima. Važnu ulogu ima u elektrostatici, mehanici fluida i nauci o toplini. Pomoću Laplaceove jednadžbe može se opisati ponašanje elektrostatskih i hidrauličkih potencijala i raspodjela temperature kod stacionarnog vođenja topline.

## 2.1. Tečenje vode u tlu

Jednadžba kontinuiteta za nestlačivi fluid (vodu) kombinirana s Darcyjevim zakonom daje Laplaceovu jednadžbu koja opisuje stacionarno tečenje vode u tlu.

Darcyjev zakon opisuje tečenje vode u homogenom i izotropnom tlu. Uvrštavanjem Darcyjevog zakona

$$\vec{v}_D = -k \vec{\nabla} h(x, y, z) \quad (1)$$

u jednadžbu kontinuiteta za nestlačivi fluid

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

dobiva se da hidraulički potencijal  $h$  mora zadovoljavati sljedeću jednadžbu:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} h(x, y, z) = \vec{\nabla}^2 h(x, y, z) = \Delta h(x, y, z) = 0 \quad (3)$$

Pri čemu je

$$\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4)$$

Laplaceov operator (engl. *Laplacian*), a homogena parcijalna diferencijalna jednadžba

$$\Delta h(x, y, z) = 0 \quad (5)$$

je Laplaceova jednadžba.

Rješavanjem **Laplaceove jednadžbe** (5) za odgovarajuće rubne uvjete može se dobiti hidraulički potencijal  $h(x, y, z)$ , a iz njega pomoću **Darcyjevog zakona** (1) moguće je izračunati polje brzina  $\vec{v}(x, y, z)$  te odgovarajuće protoke koji nas najčešće zanimaju u inženjerskoj praksi.

Za detaljniji opis problematike strujanja podzemnih voda vidjeti (Jović 2006).

## 2.2. Rubni uvjeti

Da bi se dobilo jedinstveno rješenje konkretnog fizičkog problema treba postaviti rubne uvjete. Na rubovima domene mogu se zadati vrijednosti potencijala ili temperature (Dirichletovi rubni uvjeti) ili vrijednosti prve derivacije, to jest brzine strujanja fluida ili gustoće toplinskog toka (Neumannovi rubni uvjeti).

U implementiranom računalnom programu omogućeno je zadavanje proizvoljnih Dirichletovih rubnih uvjeta, dok je za Neumannove rubne uvjete dopuštena samo vrijednost nula. U tom slučaju garantirano je da će program uvijek konvergirati k rješenju. Problem s Neumannovim rubnim uvjetima je da se oni ne mogu zadavati proizvoljno: s obzirom da je u Laplaceovu jednadžbu ugrađen zakon o očuvanju mase (jednadžba kontinuiteta), odnosno zakon očuvanja energije (ukoliko je koristimo za opisivanje stacionarnog vođenja topline) rješenje Laplaceove jednadžbe postoji samo ako je ukupni protok (ili toplinski tok) kroz sve rubove jednak nuli (poopćenje teorema 5.5 u Selvadurai 2000). U slučaju kad je jedina dopuštena vrijednost za Neumannove rubne uvjete nula (što odgovara nepropusnoj barijeri ili idealnom toplinskom izolatoru) uvjet da je ukupni protok kroz rubove domene nula uvijek je trivijalno zadovoljen i program sigurno konvergira k rješenju.

## 3. RJEŠAVANJE LAPLACEOVE JEDNADŽBE METODOM KONAČNIH RAZLIKA

Metoda konačnih razlika (diferencija) (Bronštejn i sur. 2004; Press et al. 1992) je jedna od metoda za rješavanje rubnih problema kod običnih i parcijalnih diferencijalnih jednadžbi uz pomoć računala. Derivacije se aproksimiraju konačnim razlikama, kako je to opisano u sljedećem potpoglavlju, a vrijednosti funkcije, tj. rješenja koje se traži, definirane su samo u ekvidistantnim točkama koje se nazivaju čvorovi i koji u 2D slučaju čine mrežu ili rešetku te se lako pohrane u memoriju računala.

### 3.1. Aproksimacija derivacija konačnim razlikama

Derivacija je limes kad  $\Delta x$  teži k nuli:

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (6)$$

Taj limes nije moguće provesti u računalu jer računala nemaju beskonačno mnogo memorije, odnosno potrebno je aproksimirati **izraz (6)** za slučaj kada su vrijednosti funkcije  $f$  poznate samo na konačnom broju točaka (čvorova) s nekim konačnim razmakom  $\Delta x$ .

Razvojem funkcije  $f$  u Taylorov red dobije se

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x f'(x) + \frac{1}{2} \Delta x^2 f''(x) + \frac{1}{6} \Delta x^3 f'''(x) + O(\Delta x^4) \quad (7)$$

Preslagivanjem članova prva derivacija može se izraziti kao:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} - \frac{1}{2} \Delta x f''(x) - \frac{1}{6} \Delta x^2 f'''(x) + O(\Delta x^3) \quad (8)$$

Usporedbom sa **(6)** vidi se da je pogreška proporcionalna s  $\Delta x$ . Međutim, kombiniranjem **Taylorovog reda (7)** i

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \Delta x f'(x) + \frac{1}{2} \Delta x^2 f''(x) - \frac{1}{6} \Delta x^3 f'''(x) + O(\Delta x^4) \quad (9)$$

Može se dobiti bolja aproksimacija prve derivacije:

$$f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x) = 2 \Delta x f'(x) + \frac{1}{3} \Delta x^3 f'''(x) + O(\Delta x^5) \quad (10)$$

iz čega slijedi

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x} - \frac{1}{6} \Delta x^2 f'''(x) + O(\Delta x^4) \quad (11)$$

Dakle, kod aproksimacije

$$f'(x) \approx \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x} \quad (12)$$

pogreška je proporcionalna s  $\Delta x^2$  što je povoljnije od "naivne" **aproksimacije (8)**.

Na sličan način može se dobiti i aproksimaciju druge derivacije  $f''(x)$ .

Zbrajanjem **(7)** i **(9)** dobije se:

$$f(x + \Delta x) + f(x - \Delta x) = 2 f(x) + \Delta x^2 f''(x) + \frac{1}{12} \Delta x^4 f^{(4)}(x) + O(\Delta x^6) \quad (13)$$

iz čega slijedi:

$$f''(x) = \frac{f(x+\Delta x) + f(x-\Delta x) - 2f(x)}{\Delta x^2} - \frac{1}{12} \Delta x^2 f^{(4)}(x) + O(\Delta x^4) \quad (14)$$

Dakle, druga derivacija može se aproksimirati s:

$$f''(x) \approx \frac{f(x+\Delta x) + f(x-\Delta x) - 2f(x)}{\Delta x^2} \quad (15)$$

pri čemu je pogreška proporcionalna s  $\Delta x^2$ .

Za opširniju i rigorozniju diskusiju pogrešaka vidjeti ([Press i sur. 1992](#)) i ([Burden i Faires 1989](#)).

### 3.2. Primjena metode konačnih razlika za rješavanje Laplaceove jednadžbe

Program omogućuje rješavanje problema koji je definiran u dvije prostorne dimenzije. Laplaceova jednadžba za potencijal  $h(x, y)$  koji je funkcija dvije koordinate  $x$  i  $y$  je

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (16)$$

U **potpoglavlju 3.1.** izvedena je **formula (15)** za aproksimaciju druge derivacije:

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \approx \frac{f(x+\Delta x) + f(x-\Delta x) - 2f(x)}{\Delta x^2} \quad (17)$$

Uvrštavanjem (17) u (16) uz jednake razmake između čvorova u  $x$  i  $y$  smjeru

$$a = \Delta x = \Delta y \quad (18)$$

dolazimo do jednadžbe za izračun potencijala pojedinog čvora (Lang i Pucker 2005):

$$h(x, y) = \frac{1}{4} [ h(x + a, y) + h(x - a, y) + h(x, y + a) + h(x, y - a) ] \quad (19)$$

Potencijal svakog čvora u iteraciji  $n + 1$  izračunava se na temelju vrijednosti potencijala susjednih čvorova u prethodnoj,  $n$ -toj iteraciji na sljedeći način:

$$h^{(n+1)}(x, y) = \frac{1}{4} [ h^{(n)}(x + a, y) + h^{(n)}(x - a, y) + h^{(n)}(x, y + a) + h^{(n)}(x, y - a) ] \quad (20)$$

Da bi iteriranje bilo smisленo i uspješno potrebno je definirati rubne uvjete koji se tokom iteracije ne mijenjanju. Iteriranje traje proizvoljno, odnosno iterira se sve dok iznos potencijala pojedinog čvora ne konvergira do željene preciznosti.

## 4. IMPLEMENTACIJA U JAVASCRIPT-U

Programski jezik JavaScript je odabran za implementaciju zbog njegove jednostavnosti i dostupnosti. Za vizualizaciju programske logike korišten je HTML5 *canvas* element. To je omogućilo da se program može izvoditi u običnom web pregledniku neovisno o vrsti operacijskog sustava ili računala na kojem se program izvodi.

U sljedećem potpoglavlju opisan je najvažniji dio implementacije, a cjelokupni izvorni kod programa dostupan je na adresi navedenoj u uvodu ovog rada.

### 4.1. Implementacija metode konačnih razlika

Za implementaciju metode konačnih razlika u programski jezik JavaScript bilo je potrebno definirati dva 2D polja. Jedno 2D polje koje će u sebi sadržavati vrijednosti potencijala u čvorovima koje je spremljeno pod nazivom *potencijal*, te drugo 2D polje koje definira da li pojedini čvor sadrži Dirichletov ("d") ili Neumannov ("n") rubni uvjet, ili je pak običan čvor koji sadrži vrijednost potencijala ("h"). To polje je spremljeno pod nazivom *rubniUvjet*. Funkcija koja inicijalizira ta dva 2D polja zove se *inicijalizacija()*:

```
function inicijalizacija () {
    for (var i = 0; i < brojRedova; i++) {
        potencijal[i] = new Array();
        rubniUvjet[i] = new Array();
        for (var j = 0; j < brojStupaca; j++) {
            rubniUvjet[i][j] = "h";
            potencijal[i][j] = 0.0;
            rubniUvjet[0][j] = "n";
            potencijal[0][j] = 0.0;
            rubniUvjet[i][0] = "n";
            potencijal[i][0] = 0.0;
            rubniUvjet[i][parseInt(heightG-1)] = "n";
            potencijal[i][parseInt(heightG-1)] = 0.0;
        }
    }
    for (var j = 0; j < brojStupaca; j++) {
        rubniUvjet[parseInt(widthG-1)][j] = "n";
        potencijal[parseInt(widthG-1)][j] = 0.0;
    }
}
```

Uloga funkcije *inicijalizacija()* je također i definirati početne vrijednosti svakog elementa u polju. U početku svi elementi polja *potencijal* su predefinirani na vrijednost 0, a elementi polja *rubniUvjet* su predefinirani slovom "h", koje označava potencijal. Svaki član koji se nalazi na rubu predefiniran je slovom "n" koje označava Neumannov rubni uvjet. Nakon funkcije *inicijalizacija()* potrebno je implementirati funkciju koja iterativno izračunava vrijednosti potencijala.

Vrijednost potencijala u pojedinom čvoru dobije se na sljedeći način:

- Definiranje okolnih čvorova oko trenutnog čvora za koji se računa potencijal:

```
var desno = potencijal[i+1][j];
var dolje = potencijal[i][j+1];
var lijevo = potencijal[i-1][j];
var gore = potencijal[i][j-1];
```

- Provjera da li čvor ne sadrži Dirichletov ili Neumannov uvjet:

```
if (rubniUvjet[i][j]==="d" || rubniUvjet[i][j]==="n") { ... }
```

- Provjera da li je Neumannov rubni uvjet u neposrednoj blizini trenutnog čvora za koji se računa potencijal, te ako je, ne uzima se vrijednost tog čvora jer to polje je Neumannov rubni uvjet, već se uzima vrijednost trenutnog čvora

```
if (rubniUvjet[i+1][j]==="n")
{
    desno = potencijal[i][j];
}

if (rubniUvjet[i-1][j]==="n")
{
    lijevo = potencijal[i][j];
}

if (rubniUvjet[i][j+1]==="n")
{
    dolje = potencijal[i][j];
}

if (rubniUvjet[i][j-1]==="n")
{
    gore = potencijal[i][j];
}
```

- Implementacija **formule (20)** iz **potpoglavlja 3.2.** za izračun potencijala u trenutnom čvoru:  

$$\text{potencijal}[i][j] = 0.25 * (\text{gore} + \text{dolje} + \text{lijevo} + \text{desno});$$

Potrebno je, dakako, sav kod napisati u *for* petlji ugniježdenoj unutar još jedne *for* petlje kako bi se prošlo kroz sve čvorove.

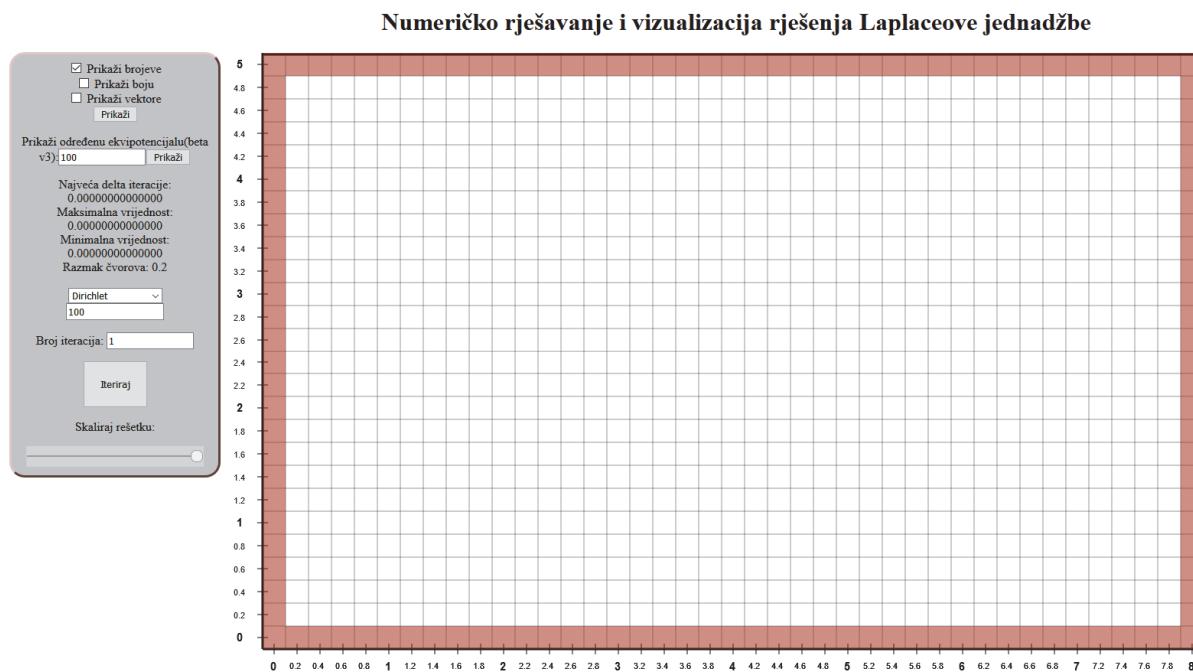
Svakom iteracijom dobiva se točnija vrijednost za pojedini čvor, a kada se vrijednosti potencijala u čvorovima prilikom iteracija više ne mijenjaju znak je da je program je konvergirao k rješenju. Kolika je točnost tako dobivenog rješenja analizirano je u **poglavlju 6.**

## 5. GRAFIČKO KORISNIČKO SUČELJE I ZADAVANJE RUBNIH UVJETA

Kako bi program funkcionirao na predviđeni način potrebno je definirati parametre presjeka te rubne uvjete u profilu. Parametri presjeka definiraju se na sljedeći način (radi jednostavnosti ulazni parametri rešetke, odnosno presjeka limitirani su samo na cijele brojeve):

- Unos visine presjeka
- Unos širine presjeka
- Definiranje broja čvorova po jedinici duljine.

Nakon uspješno definiranog presjeka, korisniku se prikazuje HTML5 *canvas* element s iscrtanom rešetkom profila (**Slika 1**), zajedno s trakom elemenata za interakciju s korisnikom koja je čvrsto „zalijepljena“ na lijevu stranu prozora web preglednika.

**Slika 1. Grafičko korisničko sučelje**

Sadržaj trake s elementima za interakciju s korisnikom (**Slika 2**):

**Prikaži brojeve** 1  
 **Prikaži boju** 2  
 **Prikaži vektore** 3  
**Prikaži**

**Prikaži određenu ekvipotencijalu(beta**  
 $v3)$ : 100 **Prikaži** 4

**Najveća delta iteracije:**  
 0.00000000000000 5  
**Maksimalna vrijednost:**  
 0.00000000000000 6  
**Minimalna vrijednost:**  
 0.00000000000000 7  
**Koeficijent rešetke:** 0.2

Dirichlet **8**  
 100 **9**

**Broj iteracija:** 1 **10**

**Iteriraj** **11**

**Skaliraj rešetku:** 12

1. Prikaz iznosa potencijala pojedinog čvora
2. Prikaz vizualizacije rješenja bojom
3. Prikaz vektorskog polja brzina
4. Prikaz određene ekvipotencijale
5. Najveća razlika između dvije posljednje iteracije
6. Maksimalna vrijednost čvora
7. Minimalna vrijednost čvora
8. Odabir rubnog uvjeta
9. Upis iznosa Dirichletovog rubnog uvjeta
10. Broj iteracija
11. Gumb "Iteriraj"
12. Mogućnost smanjenja i povećanja rešetke

**Slika 2. Traka s elementima za interakciju s korisnikom**

Da bi se definirali rubni uvjeti potrebno je:

1. Kliknuti na rubni uvjet koji se želi definirati (Dirichlet, Neumann ili Očisti rubni uvjet) (element 8)
2. Upisati iznos rubnog uvjeta (ukoliko se definira Dirichletov rubni uvjet) (element 9)
3. S pritisnutom lijevom tipkom miša povlačiti strelicu (kursor) po elementu *canvas*, po čvorovima na kojima se želi definirati rubni uvjet.

Na rubovima presjeka moraju biti zadani Dirichletovi ili Neumannovi rubni uvjeti. Unaprijed je zadan Neumannov rubni uvjet (smeđi kvadrati), a korisnik ga može zamijeniti Dirichletovim (plavi kvadrati). Rubni uvjet ne mora nužno biti samo na rubu pravokutnog presjeka (vidjeti profil na **Slici 8**).

Gumbom "Iteriraj" (element 11) iterira se rješavanje problema onoliko puta koliko je korisnik definirao upisom broja iteracija (element 10). Najveća razlika iteracije (element 5) omogućuje uvid u brzinu konvergencije profila praćenjem najveće razlike vrijednosti istog čvora između dvije posljednje iteracije u zadanim profilu.

Elementi 1, 2 i 3 omogućuju korisniku izbor načina ispisa i/ili vizualizacije rješenja u HTML5 *canvas* elementu.

Program omogućuje korisniku prikaz pojedine ekvipotencijale upisom vrijednosti potencijala te klikom na gumb "Prikaži" (element 4).

## 6. USPOREDBA S ANALITIČKIM RJEŠENJEM

Programe koji izvode numeričke proračune potrebno je temeljito testirati. Idealno je ako postoji neki jednostavniji problem kojeg je moguće riješiti i analitički. Ukoliko program ima poteškoća s reprodukcijom analitičkog rješenja to ukazuje na ozbiljne pogreške u metodi ili na jednu i više pogrešaka tijekom implementacije metode u kod. U ovom poglavlju analizirana je konvergencija numeričkog rješenja prema poznatom analitičkom rješenju za klasični problem stacionarnog vođenja topline u dvije dimenzije.

### 6.1 Opis problema

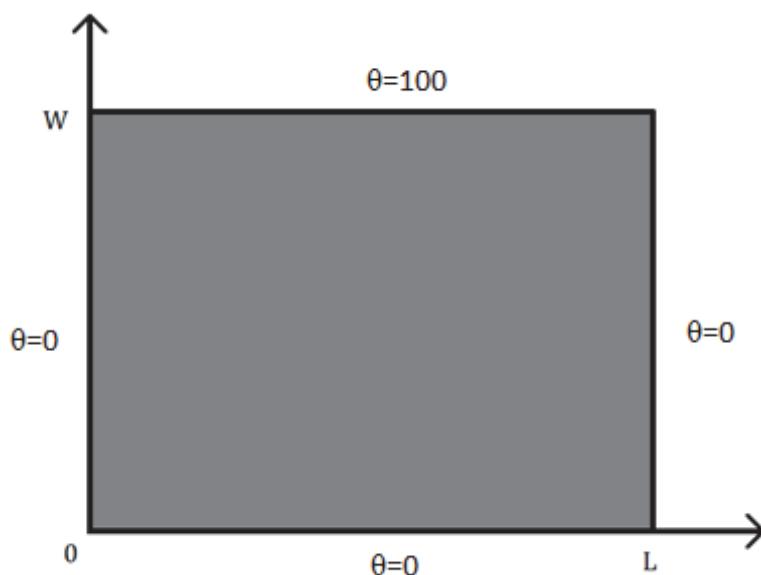
Stacionarno vođenje topline u trodimenzionalnom Kartezijevom koordinatnom sustavu opisuje Laplaceova jednadžba oblika

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

Ukoliko se proučava neki problem u kojem je jedna dimenzija daleko veća od drugih, temperaturni gradijent u tom smjeru je zanemariv. Primjer iz svakodnevnog života je šipka kojoj je dimenzija u smjeru *z* mnogo veća nego u ostalim smjerovima.

Budući da je  $\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0$  problem se svodi na nalaženje 2D polja temperature  $\theta(x, y)$  na presjeku šipke. Dakle, mora vrijediti:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (20)$$



*Slika 3. Presjek šipke*

Za sljedeće rubne uvjete poznato je analitičko rješenje:

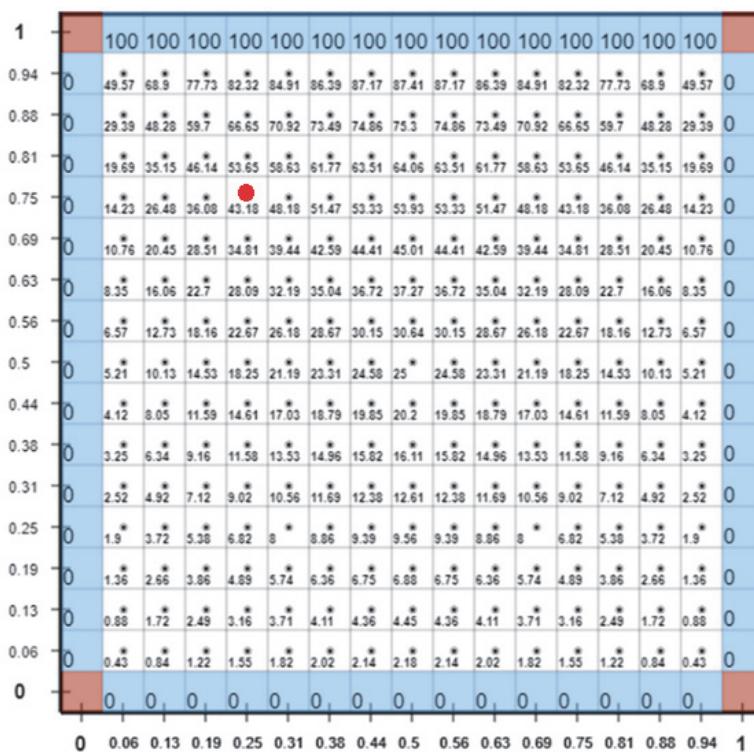
- (I) Lijeva strana:  $\theta(0, y) = 0$  ( $0 < y < W$ )
- (II) Desna strana:  $\theta(L, y) = 0$  ( $0 < y < W$ )
- (III) Donja strana:  $\theta(x, 0) = 0$  ( $0 < x < L$ )
- (IV) Gornja strana:  $\theta_g(x, W) = 100$  ( $0 < x < L$ )

Analitičko rješenje (Pitts i Sissom 1998) je u obliku beskonačnog reda:

$$\theta(x, y) = \theta_g \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} + 1}{n} \frac{\sinh \frac{n\pi y}{L}}{\sinh \frac{n\pi W}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (21)$$

## 6.2 Konvergencija metode konačnih razlika

Da bi ustavili kako odstupanja od analitičkog rješenja ovise o finoći rešetke, tj. o razmaku između čvorova, proveli smo usporedbu rješenja iz programa s različito definiranim razmakom čvorova s **analitičkim rješenjem** (21) za  $\theta_g = 100$ , dimenzije presjeka  $L = W = 1$  i točku  $(\frac{1}{4}, \frac{3}{4})$ , vidjeti **Sliku 4**.

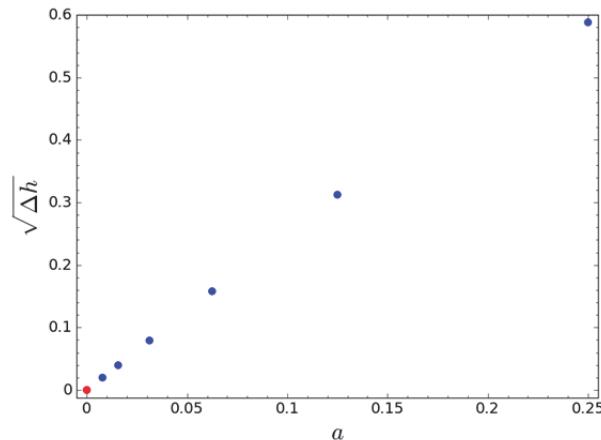


**Slika 4.** Problem definiran u programu, s razmakom između čvorova 0,0625

Analitičko rješenje je izračunato zbrajanjem prvih 20 neparnih članova reda korištenjem programa SageMath 8.3., a u našem programu problem je riješen metodom konačnih razlika s razmacima između čvorova: 0,25, 0,125, 0,0625, 0,03125, 0,015625 i 0,0078125.

**Tablica 1. Odnos odstupanja od analitičkog rješenja  $\Delta h$  i razmaka između čvorova  $a$**

Broj čvorova po jedinicu duljine	Razmak između čvorova $a$	Vrijednost potencijala	Odstupanje $\Delta h$	Omjer odstupanja
4	0,25	42,8571429	0,3456903	
8	0,125	43,1053057	0,0975275	3,5445419
16	0,0625	43,1778991	0,0249341	3,9114108
32	0,03125	43,1965711	0,0062621	3,9817513
64	0,015625	43,2012660	0,0015672	3,9956981
128	0,0078125	43,2024413	0,0003919	3,9989408
analitičko rješenje		43,2028332	0	



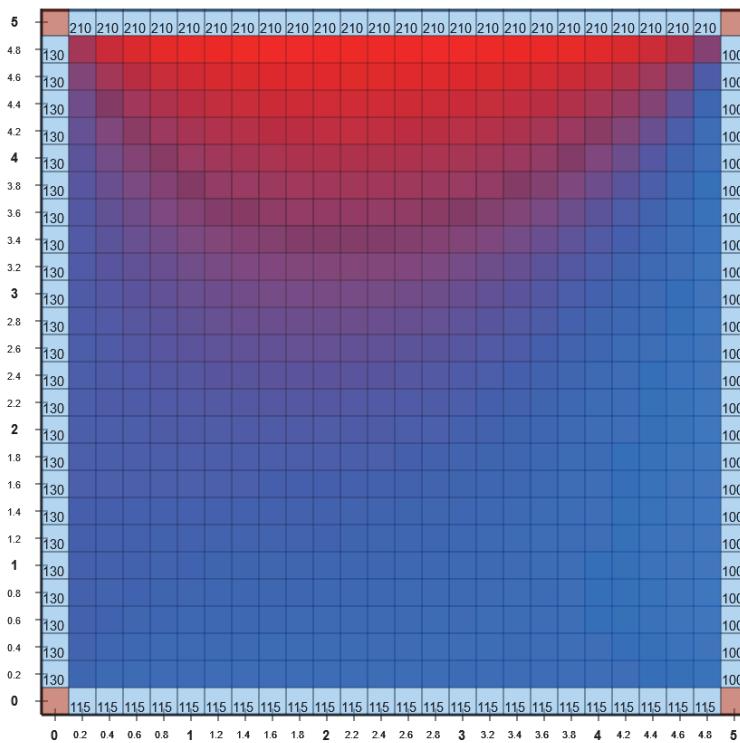
Graf 1. Odnos razmaka između čvorova  $a$  i korijena odstupanja  $\Delta h$

Kao što je vidljivo iz **grafikona 1.** odnos korijena iznosa vrijednosti odstupanja  $\sqrt{\Delta h}$  i razmaka između čvorova  $a$  je gotovo linearan, tj.  $\sqrt{\Delta h}$  je proporcionalan s  $a$ , što znači da je odstupanje  $\Delta h$  proporcionalno  $a^2$ , potpuno u skladu s **rezultatom (14)** iz **potpoglavlja 3.1**. Dakle, ako se prepolovi razmak između čvorova dobije se četiri puta manje odstupanje i kako se lijepo vidi iz **grafikona 1.** numerička rješenja (plave točke) konvergiraju točno prema analitičkom rješenju (crvena točka).

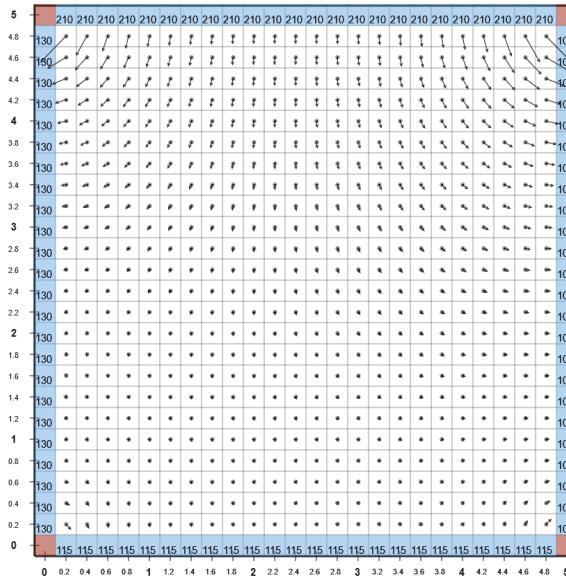
## 7. VIZUALIZACIJA RJEŠENJA

U programu su omogućeni ispis i vizualizacija rješenja putem HTML5 elementa *canvas* na sljedeće načine:

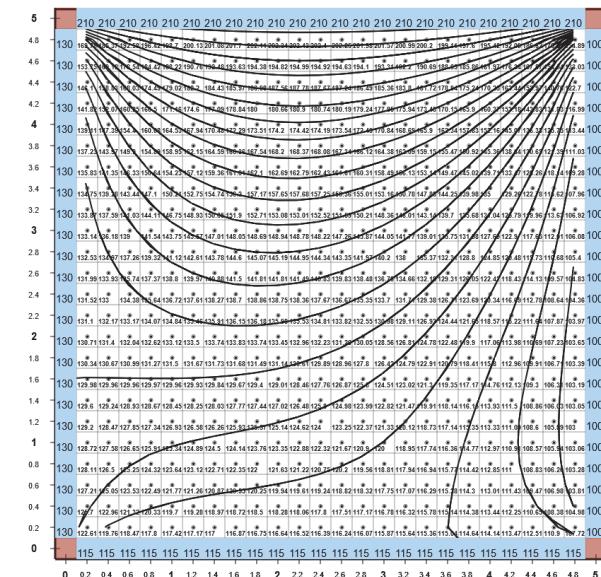
1. Ispisi vrijednosti potencijala u pojedinom čvoru (**Slika 4.**). Ispisana vrijednost je zaokružena na dvije decimale, a sve raspoložive decimale mogu se dobiti dvoklikom na pojedini čvor.
2. Raspon minimalne i maksimalne vrijednosti potencijala prikazan je gradijentom boja, gdje plava boja prikazuje minimalnu, a crvena maksimalnu vrijednost (**Slika 5.**).
3. Prikaz vektorskog polje brzina (**Slika 6.**).
4. Prikaz ekvipotencijala (**Slika 7.**).



Slika 5. Vizualizacija vrijednosti potencijala gradijentom boja u definiranom profilu visine 5, širine 5, s razmakom između čvorova 0,2



Slika 6. Vizualizacija problema visine 5, širine 5 s razmakom čvorova 0,2 vektorskim poljem brzina



Slika 7. Vizualizacija problema visine 5, širine 5 s razmakom između čvorova 0,2 ekvipotencijalama ekvidistance 5

## 8. USPOREDBA S DRUGIM PROGRAMSKIM RJEŠENJIMA

Izračun programa opisanog u ovom radu (Slika 9) uspoređen je i s rezultatima programskog paketa SEEP/W za primjer procjeđivanja kroz temeljno tlo ispod gravitacijske brane (Slika 8) opisan u (Stanojević 2012).

Uzvodna strana brane

$$H = 9 \text{ m};$$

$$u/\gamma_w (\text{tlačna visina}) = 3 \text{ m}$$

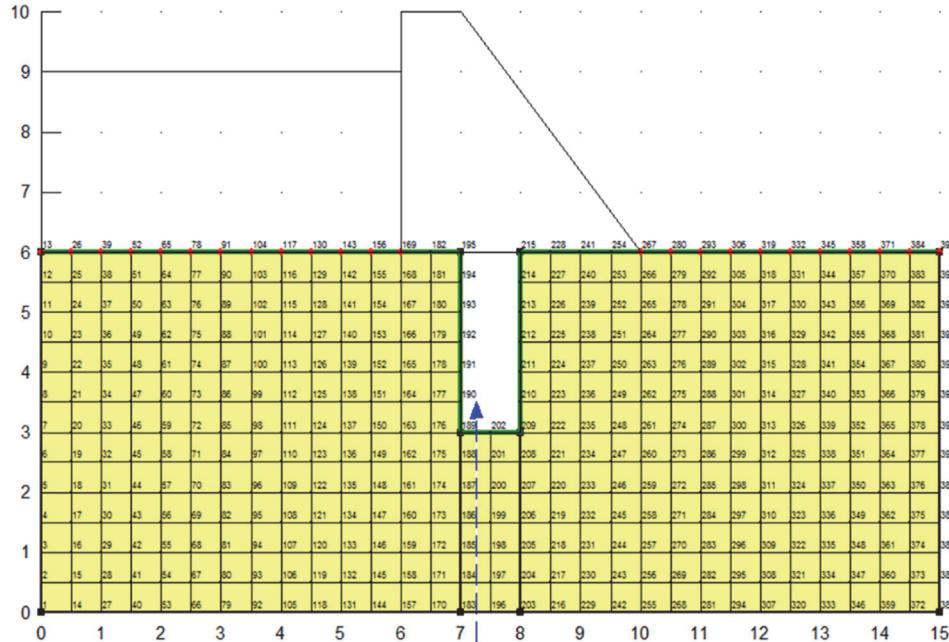
$$z (\text{geodetska visina}) = 6 \text{ m}$$

Nizvodna strana brane

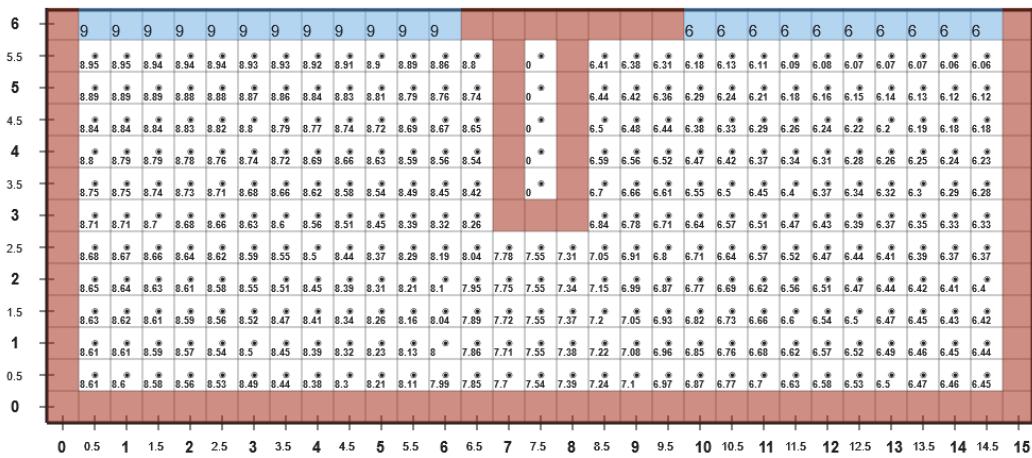
$$H = 6 \text{ m};$$

$$u/\gamma_w (\text{tlačna visina}) = 0 \text{ m}$$

$$z (\text{geodetska visina}) = 6 \text{ m}$$

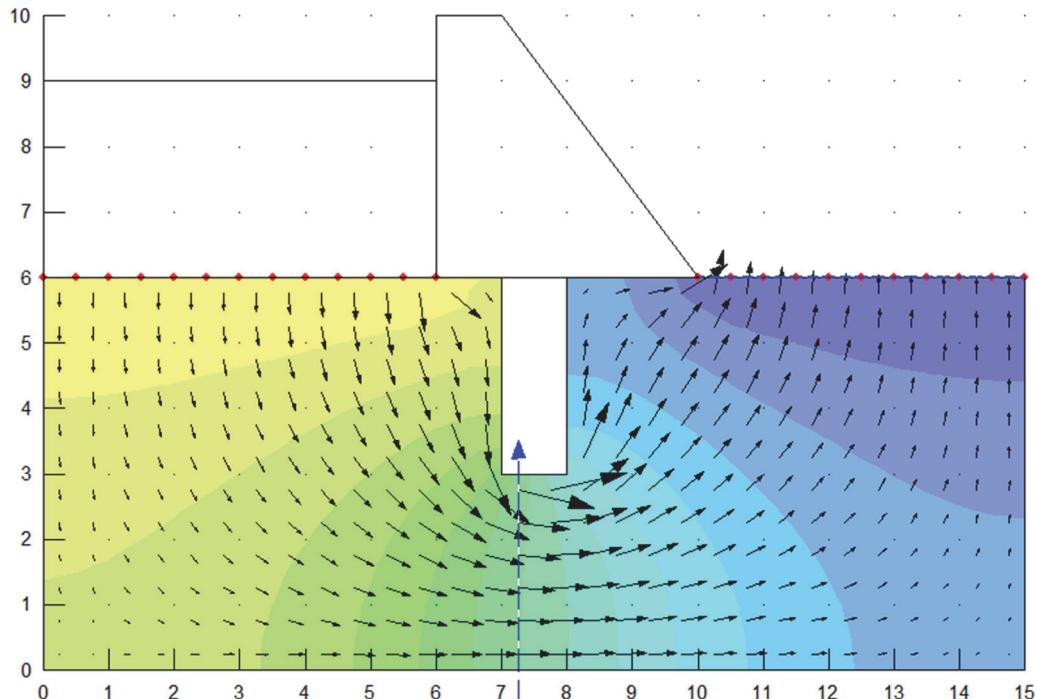


Slika 8. Skica numeričkog modela gravitacijske brane (Stanojević 2012)

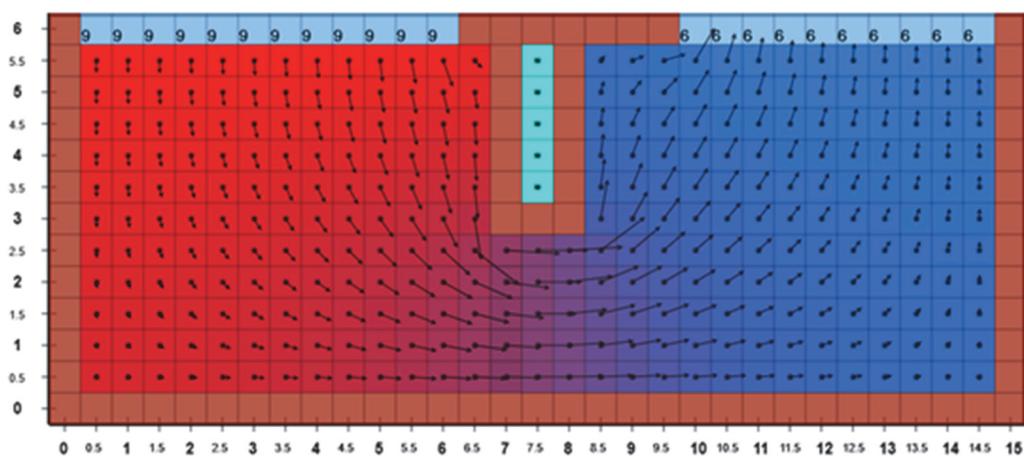


Slika 9. Profil (Stanojević 2012) definiran u našem programu

Usporedba rješenja vektorskog polja brzina (Slika 10 i 11):

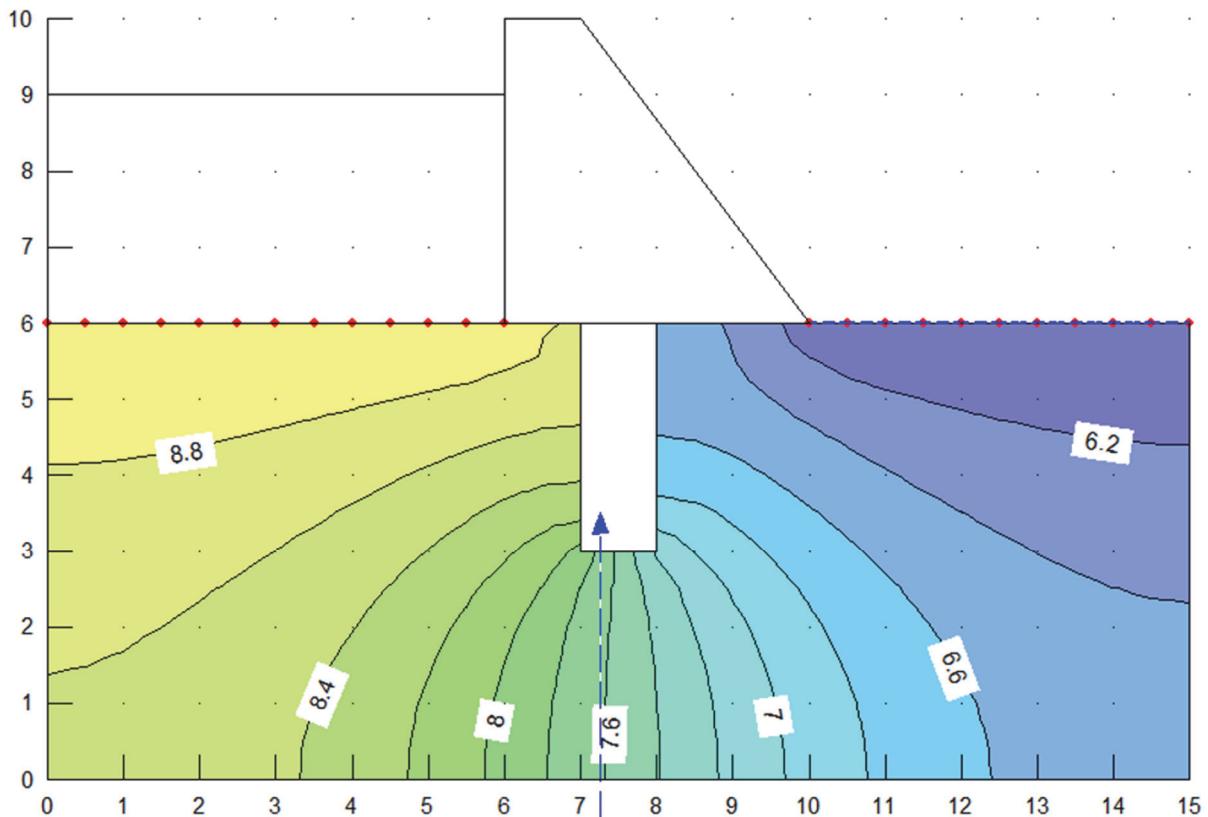


Slika 10. Prikaz vektora brzine toka (Stanojević 2012)

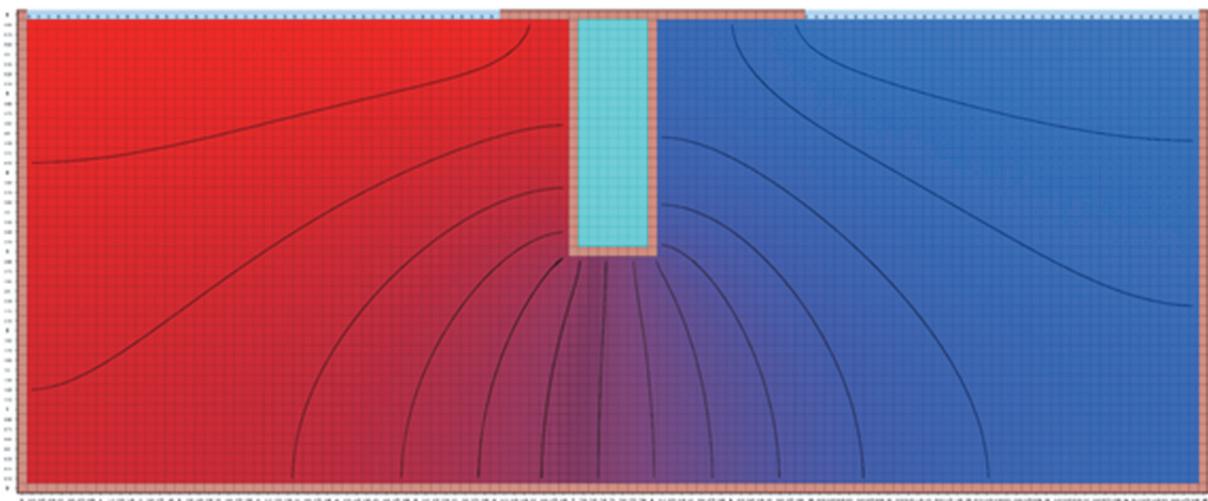


Slika 11. Prikaz vektora brzine toka u našem programu (razmak između čvorova: 0,5)

Usporedba ekvipotencijala (Slika 12 i 13):



Slika 12. Ekvipotencijale (Stanoević 2012)



Slika 13. Ekvipotencijale izračunate u našem programu (razmak između čvorova: 0,125)

## 9. ZAKLJUČAK

Razvijen je program za numeričko rješavanje i vizualizaciju rješenja Laplaceove jednadžbe koji koristi metodu konačnih razlika. Usporedbom rezultata programa s analitičkim rješenjem i rješenjima drugih programskih paketa potvrđeno je da je program ispravno implementiran. Implementacija u programskom jeziku JavaScript i HTML5 element *canvas* omogućuju vizualizaciju rješenja u bilo kojem modernom web pregledniku, a sam program i njegov izvorni kod slobodno su dostupni za korištenje na web adresama navedenim u uvodu ovog rada.

Zbog jednostavnosti korisničkog sučelja i raznolikih mogućnosti vizualizacije te lake dostupnosti putem web preglednika program je prikladan za korištenje u edukativne svrhe. Studenti ga mogu koristiti kako bi stekli intuiciju za rješenja Laplaceove jednadžbe i odgovarajuće probleme iz raznih područja znanosti i tehnike kao što su stacionarno vođenje topline i stacionarno tečenje vode u tlu.

## 10. LITERATURA

- Burden, R.L., Faires, J.D. (1989). *Numerical Analysis*, 4th Ed. Boston: PWS-KENT Publishing Company
- Jović, V. (2006). Osnove hidromehanike. Zagreb: Element. 9. pogl.
- Lang, C.B., Pucker N. (2005). *Mathematische Methoden in der Physik*, 2. Auflage. München: Elsevier GmbH (Spektrum Akademischer Verlag)
- Pitts, D.R., Sissom, L.E. (1998). *Heat Transfer*, 2nd Ed. New York: McGraw-Hill / Schaum's Outline Series.
- Press, W.H. et al. (1992). *Numerical Recipes in FORTRAN*, 2nd Ed. Cambridge: Cambridge University Press
- Selvadurai, A.P.S. (2000). *Partial Differential Equations in Mechanics I: Fundamentals, Laplace's Equation, Diffusion Equation, Wave Equation*. Berlin: Springer Verlag
- Stanojević I. (2012). *PROGRAMSKI PAKET SEEP/W*. Završni rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.
- Strelec F. (2018). *NUMERIČKO RJEŠAVANJE I VIZUALIZACIJA RJEŠENJA LAPLACEOVE JEDNADŽBE*. Završni rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.



# GEOTEHNIČKI LABORATORIJ

Tel: 042/408 909, 408 938 Fax: 042/313 587 E-mail: geolab@gfv.hr

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



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

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

## Opća fizikalna svojstva tla



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

## 2. Klasifikacijski testovi



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

## 3. Čvrstoća tla



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



## 4. Deformabilnost tla



ispitivanja u:

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



## 5. Posebna svojstva tla

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

# PROCJENA FAKTORA POBOLJŠANJA TLA PRIMJENOM MASW-A

## ASSESSMENT OF SOIL IMPROVEMENT FACTOR USING MASW

**Filip Dodigović<sup>1\*</sup>, Kristijan Grabar<sup>2</sup>, Krešo Ivandić<sup>1</sup>, Stjepan Strelec<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42 000 Varaždin, Republika Hrvatska

<sup>2</sup> SPP d.o.o., Trstenjakova 3, 42 000 Varaždin, Republika Hrvatska

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

**Sažetak:** U slučajevima temeljenja, u kojima vrijednosti slijeganja i računske otpornosti tla ne zadovoljavaju tražene kriterije, potrebno je poduzeti mjere kako bi se iste dovezle unutar prihvatljivih granica. Jedna od metoda koje se primjenjuju u takvim slučajevima je poboljšanje tla izvedbom šljunčanih pilota. Njihovom izvedbom stvara se kompozitni sustav sastavljen od tla i šljunčanih stupnjaka, čija su geotehnička svojstva povoljnija u odnosu na netretirano tlo. U fazi projektiranja procjenjuje se vrijednost stupnja poboljšanja tla ostvarenog njihovom ugradnjom. Jedna od dostupnih teorijskih metoda koja se primjenjuje u izračunavanju stupnja poboljšanja tla je Priebe-ova metoda. Parametar dobiven upotrebom navedene metode, iz kojeg se ocjenjuje rezultira li ugradnja stupnjaka zadovoljavajućim poboljšanjem je konačni stupanj poboljšanja tla „n2“, koji se aplicira na geotehničke parametre čvrstoće i stišljivosti tla. Stupanj poboljšanja tla može se procijeniti i iz rezultata seizmičkih istražnih radova, koji su provedeni prije i nakon izvedenog poboljšanja. U ovom radu analiziran je slučaj temeljenja, u kojem je tlo poboljšano ugradnjom šljunčanih pilota. U svrhu analize njihovog međusobnog odnosa, stupanj poboljšanja određen je za sve slojeve tla primjenom Priebe-ovog postupka, te iz provedenog seizmičkog istraživanja. Glavni cilj ovog rada je istraživanje potencijalne korelacije između stupnja poboljšanja tla dobivenog primjenom teorijskog modela i onog dobivenog iz in-situ istraživanja.

**Ključne riječi:** poboljšanje tla, šljunčani piloti, MASW, Priebe-ova metoda

**Abstract:** In cases of foundation design, when values of allowable settlement and soil resistance to failure do not meet the design criteria, measures must be taken in order to bring them within the acceptable limits. A method that can be applied to the ground in such cases is stone columns installation. By doing so, a composite system with improved geotechnical properties is formed in the ground. In the design stage, it is necessary to estimate a factor of improvement that will be achieved after the ground is treated. A commonly used method that is used in the estimation is developed by Heinz J. Priebe. A final parameter obtained in the calculation according to the method, which evaluates an improvement of a single soil layer is denoted as a final improvement factor "n2". The improvement factor can be estimated from seismic In-situ investigations, which are carried out before and after the ground treatment. In this paper, a case in which the ground was treated by stone columns is analyzed. The improvement factor is estimated for all soil layers both from Priebe's method and from seismic MASW survey. Then, a comparison between these values has been made. The main goal of this paper is to explore a potential correlation between improvement factor calculated using theoretical model and one measured In-situ, based on the available information from a specific case.

**Keywords:** soil improvement, stone columns, MASW, Priebe's method

---

Received: 01.10.2018. / Accepted: 27.11.2018.

Published online: 17.12.2018.

---

Stručni rad / Technical paper

## 1. UVOD

Geotehničke karakteristike temeljnog tla, djelovanja koja se s građevinama prenose na tlo i vrsta konstrukcije, u većini zadaća temeljenja najrelevantniji su podaci na osnovu kojih se donose odluke o vrsti i načinu temeljenja. U pojedinim slučajevima, za koje je dokazano da proračunate vrijednosti pojedinih djelovanja ili učinaka djelovanja ne zadovoljavaju projektne kriterije, poduzimaju se radnje kako bi se iste svezle unutar željenih granica. Zadovoljavanje projektnih kriterija odnosi se na kontrolu graničnih stanja kojima se provjerava ima li projektirana konstrukcija odgovarajuću konstrukcijsku otpornost, uporabljivost i trajnost ([HRN EN 1990:2011, 2011](#)).

U ovom radu dan je primjer u kojem temeljno tlo nije zadovoljavalo kriterije u pogledu otpornosti na slom i dozvoljenog slijeganja. Radi navedenog, pristupilo se analizi odabira načina temeljenja u danim uvjetima. Uzimajući u obzir tehničke i ekonomski čimbenike, odabrana je metoda poboljšanja tla izvedbom šljunčanih pilota. U dalnjem tekstu istražuje se mogućnost upotrebe MASW-a u procjeni stupnja poboljšanja tla ostvarenog izvedbom šljunčanih pilota.

## 2. DEFINIRANJE PROBLEMA

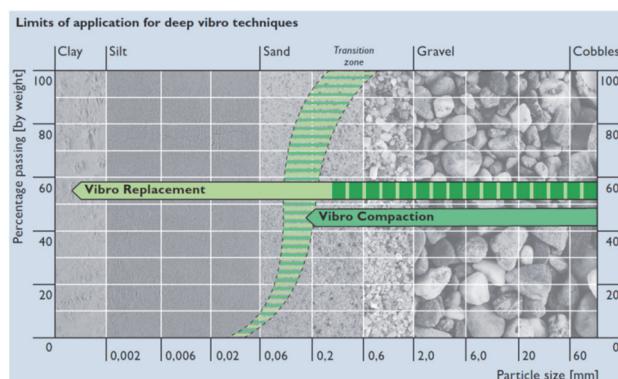
Poboljšanjem tla metodom šljunčanih pilota, određeni volumen tla zamjenjuje se šljunčanim vertikalnim stupnjacima približno kružnog poprečnog presjeka. Njihovom ugradnjom nastaje kompozitni sustav, prosječno veće gustoće, čvrstoće, i stišljivosti, u odnosu na netretirano tlo. Osim navedenog, u materijalima niske vodopropusnosti, izvedba šljunčanih pilota dovodi do ubrzavanja procesa konsolidacije.

U izradi geotehničkog projekta poboljšanja tla, primjenom teorijskih modela procjenjuje se stupanj poboljšanja za dani projektni zadatak. Uzimajući u obzir pretpostavke koje stvarno stanje u tlu zamjenjuju idealiziranim modelima, nameće se pitanje razlike u vrijednostima stupnja poboljšanja dobivenog na taj način i stvarno postignutog.

Glavni cilj ovog rada je istraživanje odnosa između ta dva stupnja poboljšanja, teorijskog i izmjerjenog *in-situ*. Teorijski stupanj poboljšanja izračunat je primjenom Priebe-ove metode, temeljem geotehničkih istražnih radova. Za procjenu stvarnog stupnja poboljšanja odabrana je MASW (*višekanalna analiza površinskih valova*) metoda. Rezultat te metode, prikaz je raspodjele brzine širenja posmičnih valova ( $v_s$ ) u tlu po dubini. Istražni radovi provedeni su prije i nakon ugradnje šljunčanih pilota, te je na osnovu promijene brzine širenja posmičnih valova donesena ocjena o stupnju poboljšanja.

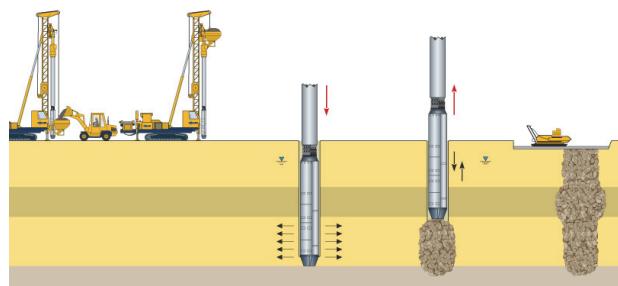
## 3. IZVEDBA ŠLJUNČANIH PILOTA

Postupak poboljšanja tla šljunčanim pilotima (eng. Vibro Replacement) pogodan je za primjenu u koherentnim materijalima te u nekoherentnim materijalima s visokim udjelom finih čestica (Slika 1). Za poboljšanje nekoherentnih materijala sa zanemarivim udjelom finih čestica udjelom primjenjeni je postupak vibracijskog zbijanja (eng. Vibro Compaction).



**Slika 1. Primjena metoda poboljšanja tla šljunčanim pilotima (eng. Vibro Replacement) i vibracijskog zbijanja (eng. Vibro Compaction) s obzirom na granulometrijski sastav tla (preuzeto s [www.kellerholding.com](http://www.kellerholding.com))**

Izvedba se provodi spuštanjem vibratora do projektom predviđene dubine, nakon čega se on podiže uz nasipavanje šljunčanog materijala. Dostizanjem željene visine, nasipani materijal se zbijja upotrebom vibratora, uslijed čega se utiskuje u okolno tlo. Kada je postignuta tražena zbijenost, postupak se ponavlja do dostizanja visine projektiranog vrha stupnjaka. Dubinski vibrator je u obliku cilindra, promjera 30 do 50 cm, dužine 3 do 4 m, ovisno o tipu, te mase cca 2 tone. U donjem dijelu vibratora, odmah iza šiljka, nalazi se ekscentrična masa s okretnim pogonom od elektromotora (snage 150 kW). Na taj način se proizvodi rotacijski udar velike energije. Dubinski vibrator spušta se pomoću produžnih cijevi do proizvoljne dubine, a vođenje osigurava posebni uređaj (Vitković i Ivandić, 2016). Na Slici 2 prikazan je način ugradnje šljunčanih pilota.



**Slika 2. Shematski prikaz izvedbe šljunčanih pilota (preuzeto s [www.kellerholding.com](http://www.kellerholding.com))**

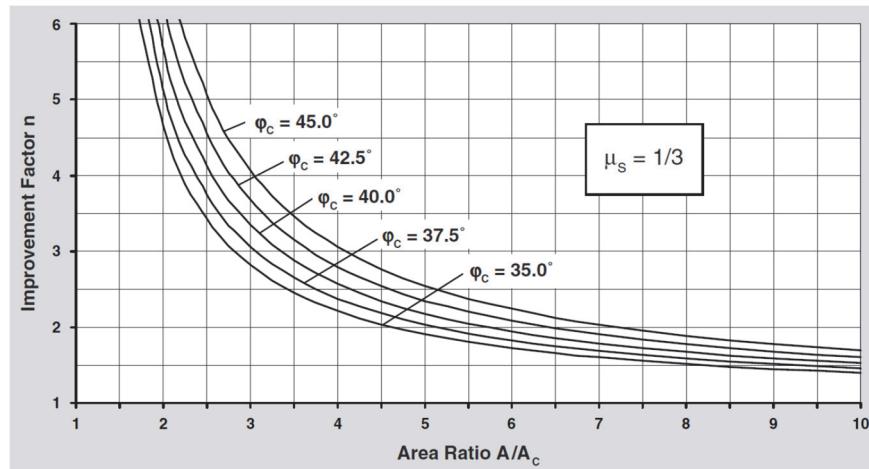
#### 4. ODREĐIVANJE STUPNJA POBOLJŠANJA TLA PRIEBE-OVOM METODOM

Metodu procijene slijeganja i nosivosti tla poboljšanog izvedbom šljunčanih pilota, razvio i publicirao je Heinz J. Priebe 1976. godine, a od tada je nad njom izvršeno nekoliko prilagodbi, proširenja i nadopuna. U dalnjem tekstu dan je pregled izračuna stupnja poboljšanja tom metodom (Priebe 1995).

Ugradnjom šljunčanih stupnjaka u tlo, nastaje kompozitni sustav geotehničkih svojstava različitih od svojstava tla prije provedbe poboljšanja. U proračunu, teoretski se razmatra neograničena opterećena površina na neograničenom rasteru stupnjaka. Jediničnu ćeliju rastera površine A čini jedan stupnjak površine  $A_c$  i tlo koje ga okružuje.

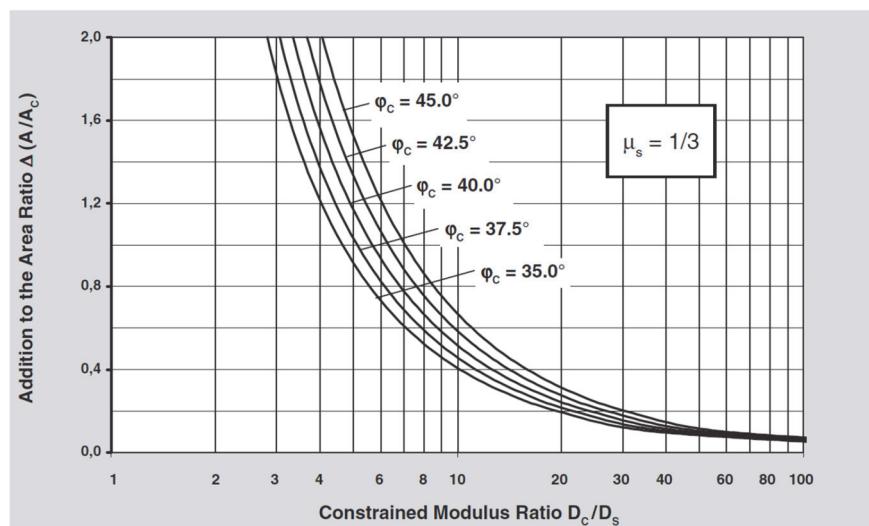
U prvom koraku proračuna, određuje se stupanj poboljšanja tla radi ugradnje i efekata ugradnje šljunčanih stupnjaka. Provedenim proračunom dobiva se osnovni stupanj poboljšanja, koji je izražen faktorom  $n_0$  (Slika 3). Za potrebe njegovog proračuna uvedene su sljedeće pretpostavke:

- Stupnjak je temeljen u krutom materijalu
- Materijal stupnjaka je nestišljiv
- Zanemarena je gustoća stupnjaka i tla



**Slika 3.** Stupanj poboljšanja tla  $n_0$ , u ovisnosti o omjeru površina  $A/A_c$  i kutu trenja materijala stupnjaka (preuzeto iz Priebe 1995)

U drugom koraku proračuna, u obzir se uzima stišljivost materijala stupnjaka. Traži se odnos površina presjeka stupnjaka i veličine rastera ( $A/A_c$ )<sub>1</sub> koji odgovara omjeru modula stišljivosti stupnjaka i tla  $D_c/D_s$  pri osnovnom faktoru poboljšanja  $n_0$ . Stišljivost materijala stupnjaka aproksimira se upotrebom reduciranih faktora poboljšanja,  $n_1$ . Navedeno se dobiva upotrebom formulacije za izračun osnovnog stupnja poboljšanja  $n_0$ , kada je omjer površina  $A/A_c$  uvećan za iznos  $\Delta(A/A_c)$  (Slika 4).



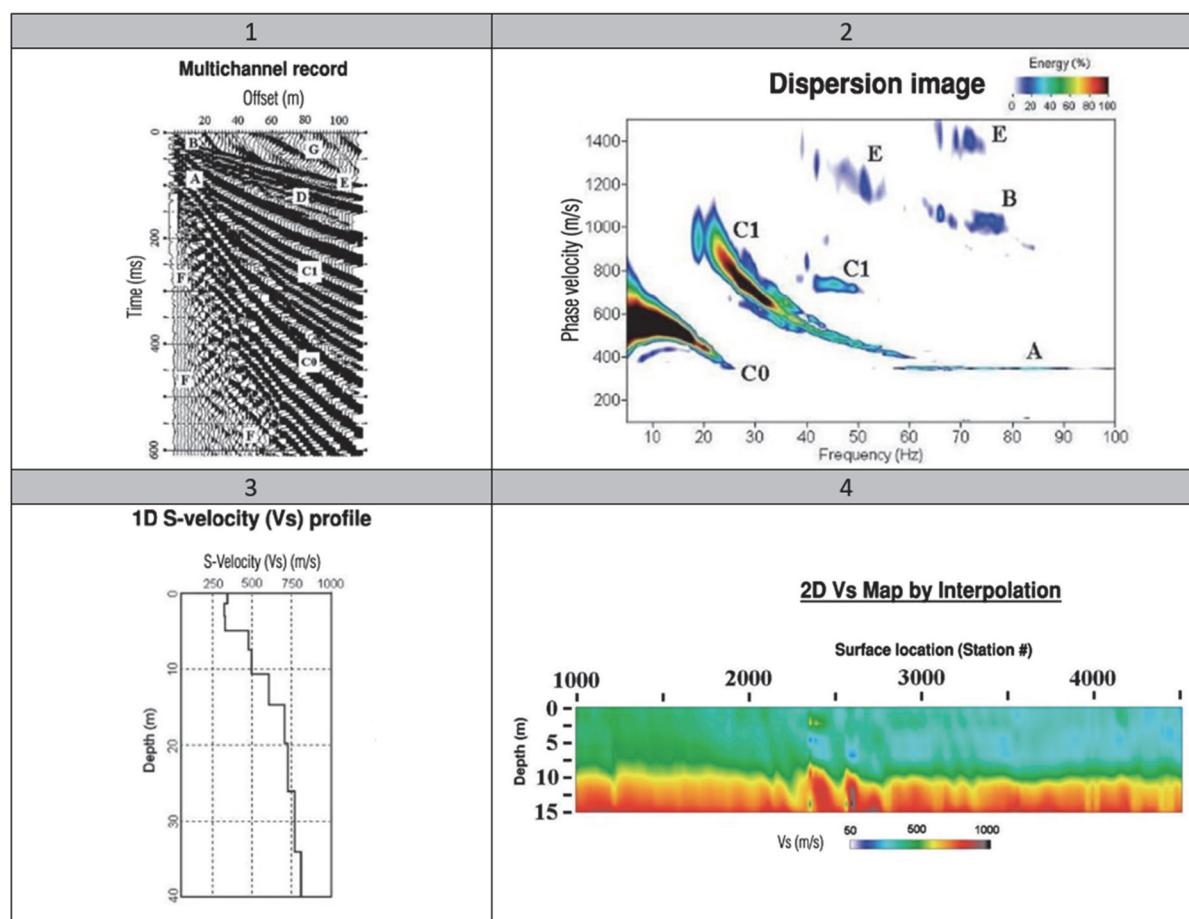
**Slika 4.** Stupanj poboljšanja tla  $n_1$ , u ovisnosti o omjeru površina  $\Delta(A/A_c)$  i omjeru stišljivosti materijala stupnjaka i tla  $D_c/D_s$  (preuzeto iz Priebe 1995)

U sljedećem proračunskom koraku, u proračun se uvodi gustoća tla i materijala stupnjaka. Zanemarivanje gustoće tla i materijala stupnjaka znači da razlika horizontalnih pritisaka između tla i stupnjaka ovisi samo o raspodjelu vanjskog opterećenja na stupnjak i tlo, te da je ona konstantna po čitavoj dužini stupnjaka. Osnovni motiv uvođenja gustoće je uzimanje u obzir stvarne raspodjele horizontalnih pritisaka između stupnjaka i tla. Budući da se ona linearno mijenja s dubinom, uvodi se faktor dubine  $f_d$ , koji povećava faktor  $n_1$  dobiven u prethodnom koraku. Množenjem faktora  $f_d$  i  $n_1$  dobiva se konačni faktor poboljšanja tla  $n_2$ .

## 5. VIŠEKANALNA ANALIZA POVRŠINSKIH VALOVA, MASW

Višekanalna analiza površinskih valova (MASW, eng. Multi-channel Spectral Analysis of Surface Waves) ubraja se u seizmičke geofizičke metode. Konvencionalni pristupi seizmičkih površinskih istraživanja obično su ili seizmička refleksija visoke rezolucije ili refrakcija, kojima se postiže dubine u rasponu od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara. Seizmički signali iz tako provedenih istraživanja sastoje se od valova frekvencija većih od 50 Hz. U MASW metodi analiziraju se površinski valovi nižih frekvencija (npr. 1-30 Hz), te se dostiže mnogo manji rasponi dubina (npr. nekoliko metara do nekoliko desetaka metara) (Park i dr. 2007).

U odnosu na druge seizmičke metode, prednost MASW-a proizlazi iz činjenice da uzima u obzir složenu prirodu seizmičkih valova. U njihovom zapisu sadržane su smetnje i šumovi, kao i površinski valovi iz osnovnog moda. Ti valovi mogu često utjecati jedni na druge prilikom analize njihovih disperzijskih svojstava, ako nisu pravilno uzeti u obzir. Višekanalnim pristupom disperzijska svojstva svih vrsta valova su snimljena pomoću metode transformacije valnog polja, koja izravno pretvara višekanalnu snimku u sliku (Slika 5, 1), u kojoj se može prepoznati specifičan raspršeni uzorak u transformiranoj distribuciji energije. Zatim se neophodno disperzijsko svojstvo (poput onoga iz osnovnog moda) izvlači iz identificiranog uzorka (Slika 5, 2). Svi drugi reflektirani/rasuti valovi obično se automatski uklanjuju tijekom transformacije. Inverzijom disperzijskih krivulja dobiju se 2D profili brzina širenja posmičnih valova po dubini (Slika 5, 3). Primjenom odgovarajuće interpolacije, iz dobivenih profila konstruira se 2D prikaz širenja brzina posmičnih valova po dubini (Slika 5, 4).



Slika 5. Redoslijed obrade podataka u primjeni MASW metode

## 6. ANALIZA SLUČAJA PROIZVODNOG POGONA JEDINSTVO - KARTONAŽA U IVANCU

Na lokaciji proizvodnog pogona tvrtke „Jedinstvo - Kartonaža d.o.o.“ u Ivancu planirana je izgradnja nadstrešnice za potrebe obavljanje djelatnosti tvrtke. Tlocrte dimenzije nadstrešnice iznose cca  $51,5 \times 64,0$  m. Njena konstrukcija je montažna, armiranobetonska, a sastoje se od predgotovljenih greda i stupova, koji se polaže u „čašice“ prethodno izvedenih temeljnih stopa. Izvedeni su geotehnički istražni radovi na osnovu kojih su identificirani slojevi tla i određene im pripadne vrijednosti relevantnih svojstava. Usvojen je model tla sastavljen od četiri geotehničke sredine (Tablica 1). U svrhu temeljenja, provedena je analiza slijeganja temeljne konstrukcije. Radi različitih djelovanja koja se sa stupova prenose na temeljne stope, one su podijeljene u 5 pozicija (T1-T5). Dobivene vrijednosti slijeganja za različite pozicije temeljnih stopa nalaze se u rasponu od cca 4 - 10 cm (Nadstrešnica za utovar i istovar kamenog materijala kartonske ambalaže - Ivanec, Izvedbeni projekt poboljšanja temeljnog tla, Izradio: GK Grupa d.o.o., travanj 2016.).

**Tablica 1. Usvojeni model tla na lokaciji Kartonaža Ivanec**

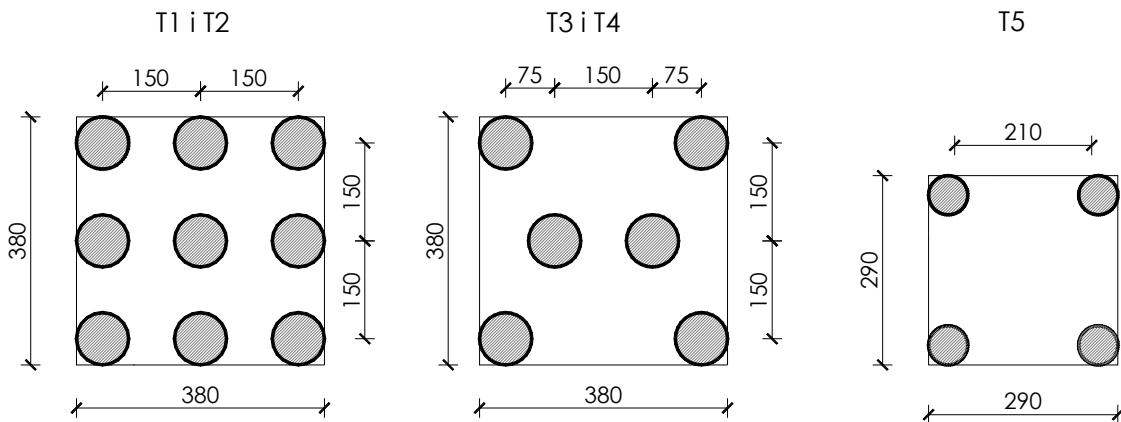
	Opis	Dubina [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'$ [°]	Mv [MN/m <sup>2</sup> ]
Geotehnička sredina 1	Nasip	1,0	20,0	0,0	30,0	10,0
Geotehnička sredina 2	Organsko tlo, treset, ugljen	3,5	12,0	2,0	22,0	2,0
Geotehnička sredina 3	Prah srednje / visoke plastičnosti	4,3	18,0	2,0	25,0	3,5
Geotehnička sredina 4	Glina srednje / visoke plastičnosti	>4,3	18,0	2,0	23,0	4,0

### 6.1 PROCJENA STUPNJA POBOLJŠANJA TLA PRIEBE-OVOM METODOM

Radi neprihvatljivih proračunskih vrijednosti slijeganja temelja, donesena je odluka o poboljšanju temeljnog tla izvedbom šljunčanih pilota. Oni se izvode ispod temeljnih stopa, a međusobni razmak, raspored i njihova geometrija (Slika 6) odabrani su s obzirom na značajke tla te veličinu djelovanja koje konstrukcija prenosi na tlo (Tablica 2).

**Tablica 2. Podaci o stupnjacima u ovisnosti o poziciji temeljne stope**

poz.	Tlocrte dimenzije temelja	Dubina temeljenja	Kontaktno naprezanje	Broj stupnjaka ispod stope	Promjer stupnjaka	Duljina stupnjaka	Efektivni kut trenja	Modul stišljivosti
	[m]	[m]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kom]	[cm]	[m]	[°]	[MN/m <sup>2</sup> ]
T1 i T2	$3,8 \times 3,8$	1,8	100,0	9	70	6,0	40,0	100,0
T3	$3,8 \times 3,8$		71,0	6	70			
T4	$3,8 \times 3,8$		66,0	6	70			
T5	$2,9 \times 2,9$		50,0	4	60			



Slika 6. Dispozicija stupnjaka po pojedinim pozicijama temeljnih stopa

Prema metodologiji opisanoj u poglavlju 4, proveden je proračun stupnja poboljšanja tla nakon ugradnje šljunčanih pilota. Ulagni parametri korišteni u proračunu prikazani su u **Tablicama 1 i 2**. Proračun je proveden u programu „StoneC“ tvrtke „GeoLogismiki“. Za ocjenu stupnja poboljšanja koristi se parametar  $n_2$ . Dani su rezultati proračuna za temeljne stope T2 i T4 (**Tablice 3 i 4**).

**Tablica 3. Rezultat proračuna stupnja poboljšanja tla na mjestu temeljnih stopa T1 i T2 (ispis iz programa „StoneC“)**

Footing name: T1 i T2												
.: Calculation of soil improvement due to vibroreplacement ::												
No	Bottom depth (m)	$n_0$	Delta (A/Ac)	$n_1$	$m_1$	$\phi_{i1}$ (degrees)	$c_1$ (kPa)	$f_d$	$n_2$	$m_2$	$\phi_{i2}$ (degrees)	$c_2$ (kPa)
1	** Current layer has no stone columns ***											
2	** Current layer has no stone columns ***											
3	3.50	2.49	0.09	2.45	0.59	33.48	0.82	1.10	2.69	0.63	34.12	0.74
4	4.30	2.49	0.17	2.42	0.59	34.40	0.83	1.10	2.65	0.62	34.93	0.75
5	7.80	2.49	0.19	2.41	0.58	33.69	0.83	1.20	2.89	0.65	34.82	0.69

$n_0$ : Basic improvement factor  
 $\Delta(A/A_c)$ : Value added to area ratio (due to column compressibility)  
 $n_1$ : Soil improvement factor (due to column compressibility)  
 $f_d$ : Depth factor (due to overburden constraint)  
\*\*\* means  $f_d$  does not meet compatibility controls  
 $n_2$ : Improvement factor (with overburden constraint)  
 $m_{1,2}$ : Proportional loads on columns (for  $n_1$  and  $n_2$  respectively)  
 $\phi_{i1,2}$ : Improved effective soil friction angle (for  $n_1$  and  $n_2$  respectively)  
 $c_{1,2}$ : Improved effective soil cohesion (for  $n_1$  and  $n_2$  respectively)

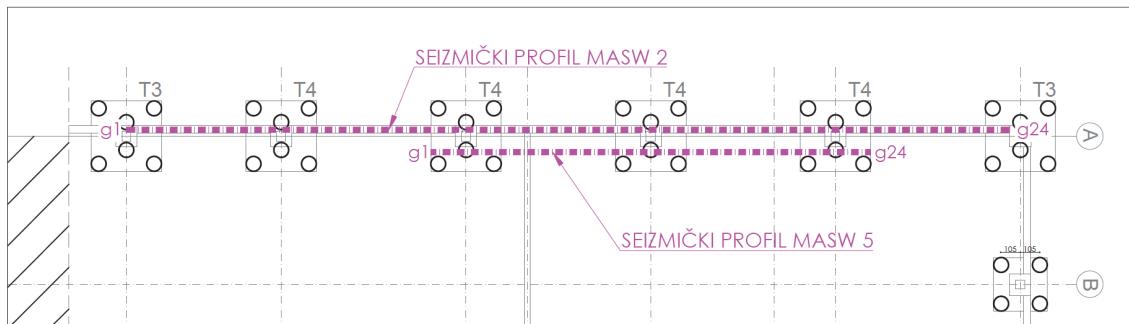
**Tablica 4. Rezultat proračuna stupnja poboljšanja tla na mjestu temeljnih stopa T4 (ispis iz programa „StoneC“)**

Footing name: T4												
.: Calculation of soil improvement due to vibroreplacement ::												
No	Bottom depth (m)	$n_0$	Delta (A/Ac)	$n_1$	$m_1$	$\phi_{i1}$ (degrees)	$c_1$ (kPa)	$f_d$	$n_2$	$m_2$	$\phi_{i2}$ (degrees)	$c_2$ (kPa)
1	** Current layer has no stone columns ***											
2	** Current layer has no stone columns ***											
3	3.50	1.90	0.09	1.89	0.47	31.32	1.06	1.08	2.04	0.51	32.05	0.98
4	4.30	1.90	0.17	1.87	0.47	32.63	1.07	1.08	2.02	0.51	33.22	0.99
5	7.80	1.90	0.19	1.87	0.47	31.69	1.07	1.16	2.18	0.54	32.96	0.92

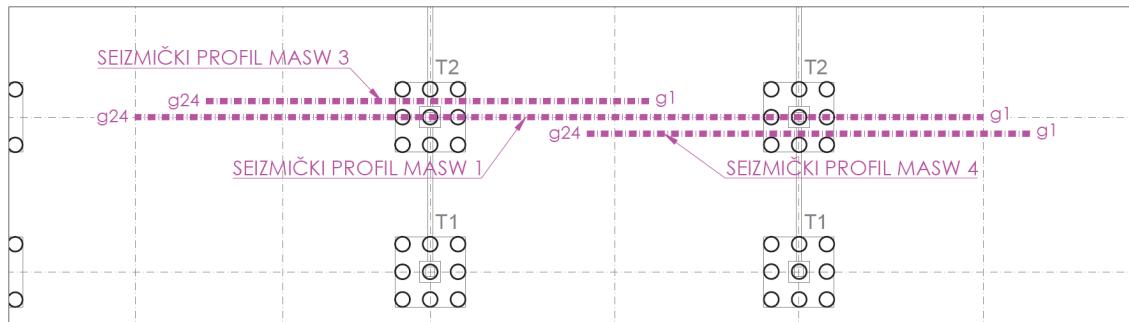
$n_0$ : Basic improvement factor  
 $\Delta(A/A_c)$ : Value added to area ratio (due to column compressibility)  
 $n_1$ : Soil improvement factor (due to column compressibility)  
 $f_d$ : Depth factor (due to overburden constraint)  
\*\*\* means  $f_d$  does not meet compatibility controls  
 $n_2$ : Improvement factor (with overburden constraint)  
 $m_{1,2}$ : Proportional loads on columns (for  $n_1$  and  $n_2$  respectively)  
 $\phi_{i1,2}$ : Improved effective soil friction angle (for  $n_1$  and  $n_2$  respectively)  
 $c_{1,2}$ : Improved effective soil cohesion (for  $n_1$  and  $n_2$  respectively)

## 6.2 PROCJENA STUPNJA POBOLJŠANJA IZ REZULTATA MASW-A

Na predmetnoj lokaciji izvedeno je 5 MASW profila. Za potrebe procjene stupnja poboljšanja tla, 2 seizmička profila izvedena su prije izvedbe šljunčanih pilota (14.04.2016.), a tri profila nakon njihove izvedbe (22.04.2016.). Lokacije seizmičkih profila odabrane su na način da se njihovom interpretacijom što pouzdanije može odrediti razlika u brzini širenja posmičnih valova prije i nakon izvedenog poboljšanja tla. MASW dispozitiv sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4.5 Hz, postavljena na međusobnom razmaku od 1,0 m, 2,0 m ili 3,0 m, i istovjetan je dispozitivu za snimanje plitke refrakcijske seizmike. Pri interpretaciji MASW mjerena koristi se fundamentalni ili osnovni mod. Tlocrtna dispozicija svih seizmičkih profila prikazana je na **Slikama 7 i 8**.

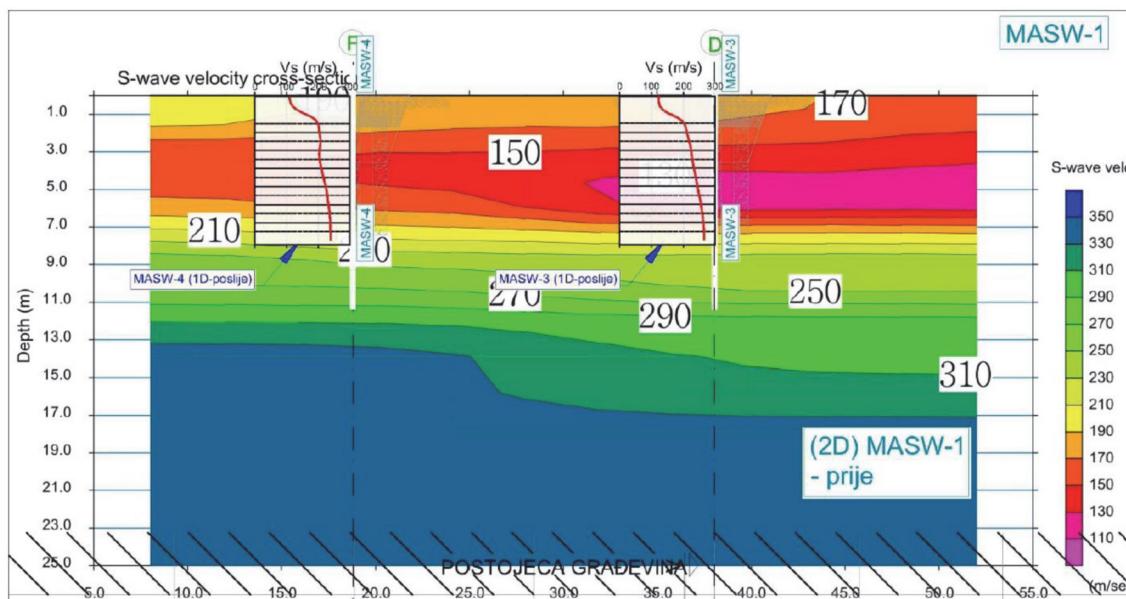


*Slika 7. Tlocrtna dispozicija seizmičkih profila MASW 2 i 5*

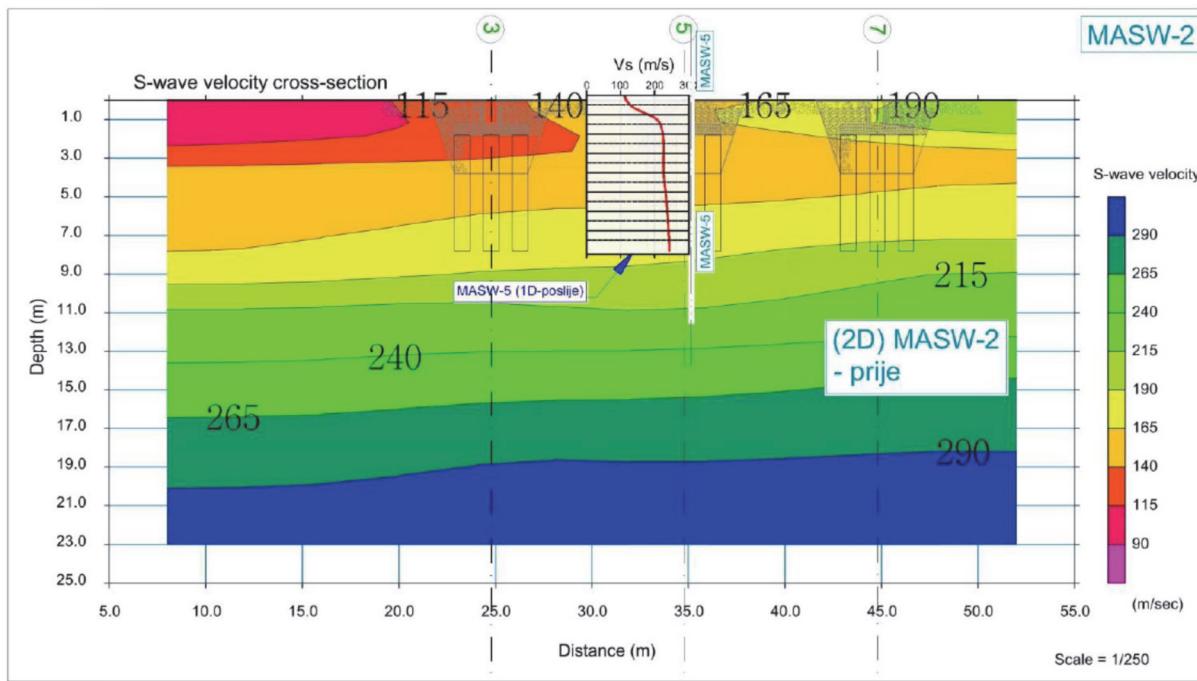


*Slika 8. Tlocrtna dispozicija seizmičkih profila MASW 1, 3 i 4*

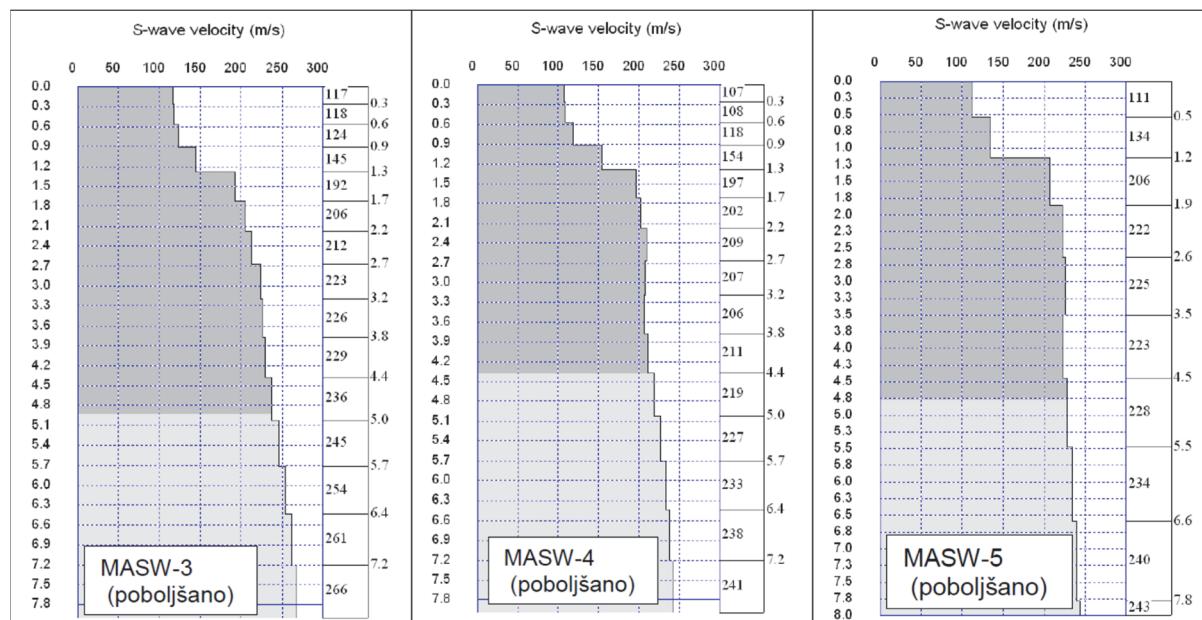
Interpretacija mjerene krivulje disperzije na lokaciji dispozitiva MASW profila provedena je koristeći računalni program SeisImager, OYO Corporation v. 4.0.1.6. Na **Slikama 9 i 10** daje se prikaz rezultata interpretacije MASW-a, odnosno brzina širenja posmičnih valova po dubini sondiranog tla.



*Slika 9. Prikaz brzine širenja posmičnih valova po dubini duž profila MASW 1, izmjereno prije izvedenog poboljšanja (Izvještaj o mjerenu posmičnih valova za potrebe utvrđivanja stupnja poboljšanja tla, 2016)*



Slika 10. Prikaz brzine širenja posmičnih valova po dubini duž profila MASW 2, izmjereno prije izvedenog poboljšanja ( Izvještaj o mjerenu posmičnih valova za potrebe utvrđivanja stupnja poboljšanja tla, 2016 )



Slika 11. Prikaz brzine širenja posmičnih valova po dubini u sredini profila MASW 3, 4 i 5, izmjereno nakon izvedenog poboljšanja ( Izvještaj o mjerenu posmičnih valova za potrebe utvrđivanja stupnja poboljšanja tla, 2016 )

Temeljem Slika 9, 10 i 11 određene su prosječne vrijednosti brzina širenja posmičnih valova za svaki sloj tla, prije i nakon izvedenog poboljšanja tla. Na Slici 11 dan je prikaz promjena brzina širenja posmičnih valova u tlu po dubini (1D prikaz), koje su izmjerene nakon poboljšanja tla. Prikazane vrijednosti dobivene su interpretacijom iz inverzije pripadajućih disperzijskih krivulja.

Stupanj poboljšanja tla određen iz provedenih seizmičkih istražnih radova definiran je sljedećim izrazom:

$$K = \frac{G_{0,1}}{G_{0,0}} \quad (1)$$

gdje su:

$G_{0,1}$  posmični modul tla kod malih deformacija nakon izvedenog poboljšanja  
 $G_{0,0}$  posmični modul tla kod malih deformacija prije izvedenog poboljšanja

Posmični modul tla kod malih deformacija u direktnoj je vezi s brzinom širenja posmičnih valova, što je prikazano u **Jednadžbi (2)**:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2 \quad (2)$$

gdje su:

$\rho$  gustoća tla

$v_s$  brzina širenja posmičnih valova u tlu

Gustoća slojeva tla prije izvedenih šljunčanih pilota određena je temeljem provedenih laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla. Ugradnjom šljunčanih pilota, gustoća tla se mijenja u odnosu na prvobitno stanje. Za potrebe određivanja posmičnog modula tla kod malih deformacija, gustoća tla nakon izvedenog poboljšanja određena je kao prosječna gustoća kompozita sastavljenog od pripadajućih volumena tla i šljunčanih pilota. U **Tablici 5** dan je zbirni rezultat proračuna određivanja posmičnog modula i stupnja poboljšanja tla određenih upotrebom formula (1) i (2).

**Tablica 5. Određivanje stupnja poboljšanja tla ( $G_{0,1}/G_{0,0}$ ) iz seizmičkih profila MASW 3, 4 i 5**

MASW 3 - TEMELJ POZICIJA T2							
dubina [m]	prije poboljšanja tla			nakon poboljšanja tla			$G_{0,1}/G_{0,0}$
	$v_s$ [m/s]	$\rho_0$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	$G_{0,0}$ [Mpa]	$v_s$ [m/s]	$\rho_1$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	$G_{0,1}$ [Mpa]	
1,8-3,5	150	1200	27	220	1368	66,2047	2,45
3,5-4,3	150	1800	27	228	1824	94,8178	3,51
4,3-7,8	150	1800	27	250	1824	113,999	4,22

MASW 4 - TEMELJ POZICIJA T2							
dubina [m]	prije poboljšanja tla			nakon poboljšanja tla			$G_{0,1}/G_{0,0}$
	$v_s$ [m/s]	$\rho_0$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	$G_{0,0}$ [Mpa]	$v_s$ [m/s]	$\rho_1$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	$G_{0,1}$ [Mpa]	
1,8-3,5	150	1200	27	205	1368	57,4846	2,13
3,5-4,3	150	1800	27	210	1824	80,4376	2,98
4,3-7,8	170	1800	34,68	230	1824	96,4886	2,78

MASW 5 - TEMELJ POZICIJA T4							
dubina [m]	prije poboljšanja tla			nakon poboljšanja tla			$G_{0,1}/G_{0,0}$
	$v_s$ [m/s]	$\rho_0$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	$G_{0,0}$ [Mpa]	$v_s$ [m/s]	$\rho_1$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	$G_{0,1}$ [Mpa]	
1,8-3,5	165	1200	32,67	222	1312	64,6606	1,98
3,5-4,3	165	1800	32,67	223	1816	90,3079	2,76
4,3-7,8	185	1800	41,07	230	1816	96,0664	2,34

## 7. ANALIZA REZULTATA

U **Tablici 6 i na Slici 12** prikazan je zbirni prikaz rezultata proračuna stupnja poboljšanja tla prije i nakon izvedbe šljunčanih pilota, za pozicije temeljnih stopa T2 i T4. Stupanj poboljšanja proračunat je na dva načina, primjenom Priebe-ove metode te iz interpretacije rezultata MASW metode. Za potrebe analize rezultata definira se parametar  $R$  (3) koji predstavlja razliku vrijednosti stupnja poboljšanja dobivenog upotrebom navedenih metoda.

$$R = |stupanj\ poboljšanja\ Priebe - stupanj\ poboljšanja\ MASW| \quad (3)$$

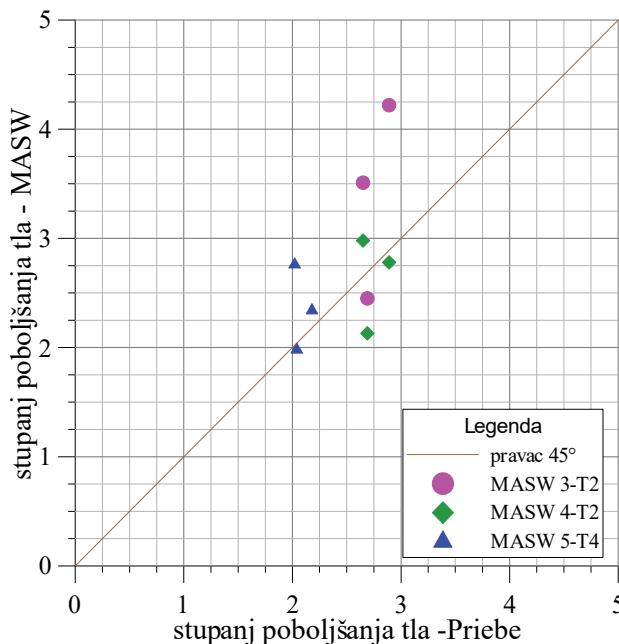
Veće vrijednosti parametra  $R$  (0.86 i 1.33) dobivene su na lokaciji seizmičkog profila MASW 3, na dubinama od 3,5 - 7,8 m. Ta činjenica objašnjava se anomalijom u brzini širenja posmičnih valova uočenoj u tom dijelu terena, koja je jasno vidljiva na **Slici 9**. Generalno, prema profilima MASW 1 i MASW 2, brzina širenja posmičnih valova raste s dubinom. Na lokaciji gdje je uočena anomalija, na dubini od cca 3,5 m, vrijednost  $v_s$  smanji se sa 150 na 130 m/s. Ta vrijednost konstantna je do dubine od cca 6,0 m, nakon koje vrijednost  $v_s$  ponovno raste s dubinom.

Iz preostalih vrijednosti danih u **Tablici 6** izračunate su vrijednosti parametra  $R$ . Njihovom statističkom analizom utvrđeno je da se vrijednosti  $R$  nalaze unutar granica 0,03 - 0,56. Srednja vrijednost iznosi 0,24, a standardna devijacija 0,19, što rezultira koeficijentom varijacije iznosa 0,79.

Tablica 6. Zbirni prikaz stupnja poboljšanja tla ispod temelja pozicija T2 i T4

dubina [m]	STUPANJ POBOLJŠANJA TLA								
	Temelj T2			Temelj T2			Temelj T4		
	Priebe	MASW 3	R*	Priebe	MASW 4	R*	Priebe	MASW 5	R*
1,8-3,5	2,69	2,45	0,24	2,69	2,13	0,56	2,04	1,98	0,03
3,5-4,3	2,65	3,51	0,86	2,65	2,98	0,33	2,02	2,76	0,37
4,3-7,8	2,89	4,22	1,33	2,89	2,78	0,11	2,18	2,34	0,07

\* Formula (3)



Slika 12. Prikaz odnosa stupnja poboljšanja određenog Priebe-ovom i MASW metodom

## 8. ZAKLJUČAK

U provedenim analizama uspoređivani su rezultati proračuna stupnjeva poboljšanja tla dobiveni primjenom teoretskog modela (Priebe-ova metoda) s rezultatima dobivenim mjerjenjem *in-situ* (MASW). Dobiveni rezultati analizirani su i prikazani u međusobnom odnosu. U tu svrhu izrađen je dvodimenzionalni Kartezijev koordinatni sustav u kojem se na apscisu nanosi stupanj poboljšanja tla dobiven primjenom Priebe-ove metode, a na ordinatu stupanj poboljšanja tla proračunat iz MASW-a.

Ukoliko se iz razmatranja izostave točke iz profila MASW3 (s dubina većih od 3,5 m radi uočene anomalije u tlu), u koordinatnom sustavu sa Slike 12 uočava se grupiranje podataka oko pravca nagiba  $45^\circ$ . Navedeno ukazuje na mogućnost postojanja linearne korelacijske veze između tih grupa podataka. S obzirom na relativno mali broj dostupnih rezultata, u ovom radu nisu moguće statističke analize koje bi rezultirale kvantifikacijom tog korelacijskog odnosa.

Predlaže se daljnje istraživanje odnosa između stupnjeva poboljšanja tla dobivenih primjenom teoretskih modela i onog dobivenog iz *in-situ* istraživanja, a koje bi obuhvačalo statistički značajan broj podataka.

## 9. LITERATURA

HRN EN 1990:2011, Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija (2011)

Park, C. B.; Miller, R. D.; Ryden, N.; Xia, J. & Ivanov, J. (2007): Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. The Leading Edge, 26, 1, 60-64.

Priebe, H.J. (1995): The design of vibro replacement. Ground Engineering 28, December, 31–37

Vitković, V.; Ivandić, K. (2016) Primjeri uporabe šljunčanih pilota za ubrzanje konsolidacije i ojačanje tla. INŽENJERSTVO OKOLIŠA, Vol.3 / No.2, 73-78

<http://www.kellerholding.com/deep-vibro-techniques.html>

# PROCESI ISHOĐENJA LOKACIJSKE DOZVOLE ZA PROJEKT PODRAVSKE BRZE CESTE

## PROCESSES OF OBTAINING LOCATION PERMIT FOR PODRAVSKA HIGHWAY PROJECT

**Paula Benjak<sup>1\*</sup>, Milan Rezo<sup>1</sup>, Nikola Kranjčić<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000, Varaždin, Republika Hrvatska*

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

**Sažetak:** Uslijed povećanog prometa državnom cestom D2 od Varaždina prema Dubravi Križovljanskoj već se dugi niz godina predviđa gradnja Podravske brze ceste, kako bi se rasteretio promet kroz naselja i povećala sigurnost prometa. U radu se prikazuje uvid u proces ishođenja lokacijskih dozvola, u ovom slučaju za Podravsku brzu cestu. Također se pobliže objašnjavaju čijem su vlasništvu ceste u Republici Hrvatskoj, kakve ceste izvan naselja postoje i od kojih su dijelova sačinjene. Opisat će se konstrukcijski elementi cesta i značenje prostornih planova u smislu iniciranja pa do konačnog donošenja i izvedbe. Sastavni dio izrade idejnog projekta su podloge za projektiranje, te će se u radu prikazati različite podloge i za što nam služe.. Digitalni katastarski plan (DKP) uključuje sve katastarske čestice na području kojeg prolazi cesta kako bi se pravovremeno zatražilo vlasništvo na područjima prolaska cestovne konstrukcije i dobila dozvola za gradnju na tim posjedima. Sve potrebne skice izrađene su pomoću programskog paketa Plateia, kojom se projektiraju sve prometnice i ostala pripadajuća infrastruktura.

**Ključne riječi:** lokacijska dozvola, idejni projekt, ceste izvan naselja, podloge za projektiranje, Plateia

**Abstract:** Due to dense traffic on the state road D2 from Varaždin to Dubrava Križovljanska, construction of Podravsk highway has been planned for many years in order to dismantle traffic through settlements and increase traffic safety. This paper presents an insight into the process of obtaining location permits, in this case for Podravsk highway. It will also be explained more precisely on the ownership of the roads in the Republic of Croatia, which roads outside the settlement exist and which parts are made of. The constructional elements of the road and the significance of the spatial plans will be described in terms of initiation and until final adoption and execution. An integral part of the preliminary design project are background bases for design, and this paper will show different background bases and what purpose can they fulfil. The Digital Cadastral Plan (DKP) includes all cadastral particles in the area where the road passes in order to timely request ownership of the road construction areas and obtain a building permit on those properties. All necessary sketches were made using the Plateia software package, which designs all roads and other associated infrastructure.

**Keywords:** location permit, preliminary design, roads outside the settlement, background base for design, Plateia

---

Received: 01.10.2018. / Accepted: 27.11.2018.

Published online: 17.12.2018.

---

Stručni rad / Technical paper

## 1. UVOD

Izgradnjom Podravske brze ceste omogućila bi se zamjenska trasa koja bi razdvojila lokalni i gradski promet od tranzitnog. Vozeći se dionicom od Varaždina do Maribora kroz naselja Hrašćica, Sračinec, Majerje, Petrijanec, Gornje Vratno i Cestica državnom cestom D2 lako se može uočiti problem protočnosti prometa. Problemi se javljaju u središtima većih mesta (Sračinec, Petrijanec, Cestica) posebice ispred javnih ustanova (škola, vrtića). Gustoća prometa predstavlja neposrednu opasnost za sve sudionike prometa, te kako bi se povećala protočnost prometa a ujedno i povećala sigurnost neophodno je izgraditi obilaznicu tih mjesto. Obilaznica će ujedno predstavljati spoj obilaznice Varaždina sa Slovenijom što će dodatno pridonijeti gospodarskom rastu i razvoju naselja uz novoizgrađenu prometnicu. Budući da je za početak gradnje potrebno ishoditi građevinsku dozvolu, koja se izdaje temeljem lokacijske dozvole u radu će se prikazati sastavni dijelovi potrebni za ishođenje lokacijske dozvole. „Lokacijska dozvola je upravni akt kojim se na temelju važeće prostorno-planske dokumentacije i posebnih uvjeta, potvrda, mišljenja i drugih akata tijela državne uprave i pravnih osoba s posebnim ovlastima, utvrđuju uvjeti za gradnju određene građevine.“ ([Republika Hrvatska, Ured državne uprave u Varaždinskoj županiji](#)). Lokacijska dozvola se može izdavati za razna područja, a u slučaju izdavanja za Podravsku brzu ceste potrebno je izdavanje lokacijske dozvole za građenje na zemljištu, odnosno građevini za koje investitor nije riješio imovinsko pravne odnose ili za koje je potrebno provesti postupak izvlaštenja (Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja).

Izdavanje lokacijske dozvole pokreće se na zahtjev zainteresirane stranke uz koji se prilaže:

- Tri primjerka idejnog projekta
- Izjava projektanta da je idejni projekt izrađen u skladu s prostornim planom
- Posebni uvjeti i/ili dokaz da je podnešen zahtjev za utvrđivanje posebnih uvjeta
- Rješenje o prihvatljivosti zahvata za okoliš ako se radi o zahvatu u prostoru za koji se prema posebnim propisima provodi postupak procjene utjecaja zahvata na okoliš i/ili ocjene prihvatljivosti zahvata na ekološku mrežu
- Potvrda o nostrifikaciji idejnog projekta, ako je projekt izrađen prema stranim propisima.  
(Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja).

Idejni projekt je skup međusobno usklađenih nacrta i dokumenata struka koje, ovisno o vrsti zahvata u prostoru, sudjeluju u projektiranju, kojima se daju osnovna oblikovno-funkcionalna i tehnička rješenja zahvata u prostoru (idejno-tehničko rješenje) i prikazuje smještaj jedne ili više građevina na građevnoj čestici i unutar obuhvata zahvata u prostoru ([Rezo 2017](#)). Idejnim projektom se određuju osnovna polazišta značajna za osiguravanje postizanja temeljnih zahtjeva za građevinu i drugih zahtjeva za građevinu ([Zakon.hr](#)).

## 2. CESTE IZVAN NASELJA

Javne ceste su ceste u vlasništvu Republike Hrvatske koje se ne mogu otuđiti iz njezinog vlasništva te se na njima ne mogu stjecati stvarna prava, osim u slučajevima propisanim Zakonom o cestama. Slučajevi u kojima se može osnovati pravo služnosti i građenja, a propisani su Zakonom o cestama su: izgradnja komunalnih, vodnih i energetskih građevina i građevina koje predstavljaju elektroničku komunikaciju i povezanost opreme. U daljnjoj izvedbi cestovno zemljište se može dati na korištenje radi obavljanja pratećih djelatnosti kao što su ugostiteljstvo, benzinske postaje, trgovine i ostalo. Sve prateće djelatnosti su također propisane Zakonom o cestama. Prema konfiguraciji tj. vrsti terena kojim cesta prolazi ceste se dijele na: ceste u ravnici (nizinske ceste), ceste u brežuljkastom terenu, ceste u brdovitom terenu i ceste u planinskom terenu ([Rezo 2017](#)).

**Tablica 1. Javne ceste izvan naselja**

Osnovne karakteristike terena	Konfiguracija terena			
	Ravnica I.	Brežuljkast II.	Brdovit III.	Planinski IV.
ΔH/1 km	Neznatna	Do 70 m	70 do 150 m	Preko 150 m
Nagib padina	Do 1:10	1:10 do 1:5	1:5 do 1:1	1:1 do 1:0
Naboranost terena	-	Slabije izražen	Jače izražen	Vrlo jak/greben/uvale
Mogući elementi trase	Bez ograničenja (BO)	Izbor neznatno ograničen (NO)	Znatno ograničen (ZO)	Veliko ograničenje (VO)

## 3. PROSTORNI PLANOVNI

Prostorno uređenje nam osigurava korištenje, zaštitu i upravljanje prostorima u Republici Hrvatskoj, a time se ostvaruju pretpostavke za društveni i gospodarski razvoj, zaštitu okoliša i prirode, vrsnoću gradnje i racionalno korištenje prirodnih i kulturnih dobara. Ciljevi prostornog uređenja postižu se primjenom načela prostornog uređenja u izradi i donošenju prostornih planova te njihovoju provedbi ([Zakon.hr](#)). Izrada prostornog plana započinje na temelju odluke o izradi prostornog plana, koju donosi Vlada na prijedlog Ministarstva po prethodno pribavljenom mišljenju sukladno posebnim zakonima kojima se uređuje zaštita okoliša i prirode, ako se radi o izradi prostornog plana državne razine. Odluku o izradi prostornog plana područne (regionalne), odnosno lokalne samouprave donosi predstavničko tijelo jedinice područne (regionalne), odnosno lokalne samouprave po prethodno pribavljenom mišljenju sukladno posebnim zakonima kojima se uređuje zaštita okoliša i prirode. Odluka o izradi prostornog plana objavljuje se u »Narodnim novinama«, odnosno u službenom glasilu jedinice lokalne, odnosno područne (regionalne) samouprave koja je tu odluku donijela, te se odluka dostavlja Zavodu ([Zakon.hr](#)). Nacrt konačnog prijedloga prostornog plana izrađuje stručni izrađivač u suradnji s nositeljem izrade nakon što je provedena javna rasprava i izrađeno izvješće o javnoj raspravi, a nacrt sadrži tekstualni i grafički dio plana i dostavlja se zajedno s izvješćem o javnoj raspravi tijelu koje je utvrdilo prijedlog prostornog plana, a koje utvrđuje i konačni prijedlog prostornog plana ([Zakon.hr](#)).

#### 4. PODLOGE ZA PROJEKTIRANJE

Prilikom procesa ishođenja svakog projekta jedan od bitnijih uvjeta za kvalitetno i točno projektiranje je i kvalitetna geodetska podloga, na osnovi koje se izrađuje projekt. Kod izrade idejnog projekta najbrže se poslužiti kartama dostupnim putem geoportala državne geodetske uprave, a koje nam mogu služiti kao podloga za projektiranje.

Na geoportalu dostupne su slijedeće karte:

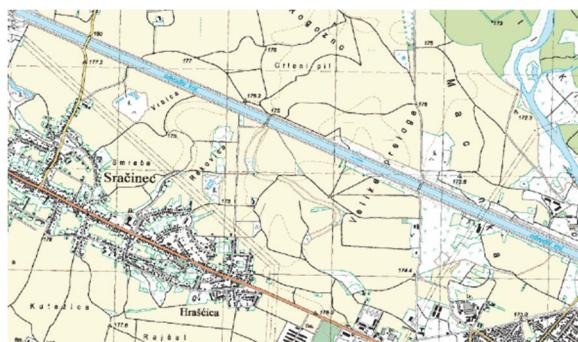
- Topografska karta (TK) – **Slika 1**
- Hrvatska osnovna karta (HOK) – **Slika 2**
- Digitalni ortofoto (DOF) – **Slika 3**

Topografska karta (**Slika 1**) predstavlja geografsku kartu koja sadrži veliki broj informacija prikazanog područja koje se odnose na naselja, prometnice, vode, vegetaciju, oblike reljefa Zemlje i granice teritorijalnih područja (Wikipedia).

Hrvatska osnovna karta (HOK) (**Slika 2**) je osnovna službena državna karta i izrađuje se u mjerilu 1:5000. Službena državna karta kodirana je slika prirodnih i izgrađenih objekata zemljine površine koja se izrađuje za cjelokupno područje RH (Geoportal DGU).

Digitalna ortofoto karta (DOF5) (**Slika 3**) je službena državna karta i izrađuje se u mjerilu 1:5 000 za cjelokupno područje Republike Hrvatske. DOF5 se koristi za administrativne svrhe, a posebice za urbano i ruralno planiranje (Geoportal DGU).

Na topografskoj karti prikazan je plan prolaska Podravske brze ceste, a HOK i DOF pomažu u planiranju projekta na način da se vide prirodne i umjetne prepreke koje se uzimaju u obzir prilikom projektiranja.



*Slika 1. Topografska karta (TK)*



*Slika 2. Hrvatska osnovna karta (HOK)*



*Slika 3. Digitalni ortofoto (DOF)*

#### 5. DIGITALNI KATASTARSKI PLAN S PRIKAZIMA PARCELACIJSKIH LINIJA

Sastavni dio ishođenja lokacijske dozvole je digitalni katastarski plan s prikazima parcelacijskih linija, pomoću kojeg se daje prijedlog prijavnih listova za katastar i zemljišnu knjigu radi rješavanja imovinsko pravnih odnosa za područja koja još nisu u vlasništvu Republike Hrvatske. Za potrebe idejnog projekta dovoljno je koristiti neslužbene podatke koji su besplatno dostupni putem servisa *Uredena zemlja*. **Tablice 2 i 3** prikazuju prijedlog prijavnog list za katastar, odnosno jednu od čestica kojom treba prolaziti Podravska brza cesta u stanju prije provođenja parcelacije i nakon. Temeljem izrađenog i na katastru ovjerenog parcelacijskog elaborata predstavnici Republike Hrvatske sklapaju kupoprodajne ugovore na česticama kojima će prolaziti novoizgrađena cesta.

Tablica 2. Prijedlog prijavnog lista za katastar – dosadašnje stanje

Broj posjedovnog lista	Dio ili udio dijela	Suvlasnički dio na dijelu	Prezime i ime odnosno tvrtka ili naziv upisane osobe, OIB Prebivalište odnosno sjedište, ulica i kućni broj upisane osobe	dio zgradna	Dosadašnje stanje						Posebni pravni režimi	Broj z.k.ul.		
					Broj katastarske čestice	Broj detaljnog lista	Adresa katastarske čestice (naziv rudine, ulice, trga i sl.)	Način uporabe katastarske čestice/ Način uporabe zgrade,kućni brojevi zgrade , naziv zgrade, pravo građenja	Površina					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	ha	a	m <sup>2</sup>	10	11	12
2857			Kovačić Miljenko, Stjepanov, 1/1 Sračinec, Varaždinska 155 (vlasnik) OIB: 47675282394		1890		Špitalica	oranica		72	29		569	
										72	29			

Tablica 3. Prijedlog prijavnog list za katastar – novo stanje

Broj posjedovnog lista	Dio ili udio dijela	Suvlasnički dio na dijelu	Prezime i ime odnosno tvrtka ili naziv upisane osobe, OIB Prebivalište odnosno sjedište, ulica i kućni broj upisane osobe	dio zgradna	Novo stanje						Površina	Broj z.k.ul.	
					Broj katastarske čestice	Adresa katastarske čestice (naziv rudine, ulice, trga i sl.)	Način uporabe katastarske čestice/ Način uporabe zgrade,kućni brojevi zgrade , naziv zgrade, pravo građenja	ha	a	m <sup>2</sup>			
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22				
2857			Kovačić Miljenko, Stjepanov, 1/1 Sračinec, Varaždinska 155 (vlasnik) OIB: 47675282394		1890/1	Špitalica	oranica		31	72		569	
					1890/2		oranica		22	08			
					1890/3		oranica		19	32			
									73	12			

## 6. PLATEIA

Plateia je programski paket za rekonstrukciju postojećih cesta svih kategorija, od autocesta do mjesnih cesta i puteva i projektiranje novih, te služi kao pomoć projektantima u pripremi nacrtu i tehničke dokumentacije, a sve to zbog mnogih mogućnosti koje nudi. Osnova za njeno djelovanje je Autodeskov program AutoCAD (Korisnički priručnik PLATEIA 6.0). U projektiranju Podravske brze ceste korišteni moduli su: situacija, osi, uzdužni i poprečni profil.

## 6.1. Situacija

Modul Situacija je namijenjen pripremi geodetskih nacrta ili podloga za kasnije projektiranje cesta ili drugih objekata niskogradnje. Nacrti izrađeni s modulom Situacija su crteži u koje se mogu zapisivati brojčani podaci, a koji se mogu kasnije koristiti u projektiranju. Modul Situacija također sadrži dodatke za razne geodetske proračune (Korisnički priručnik PLATEIA 6.0). Prikaz građevinske situacije vidljiv je na **Slici 4**.

## 6.2. Osi

Modul Osi namijenjen je horizontalnom definiranju toka trase ceste. Osnovu obično predstavlja geodetski snimak, odnosno digitalni model terena. U okviru projekta može se obrađivati neograničen broj osi, kojima se može pridružiti kategorija ceste. Uz svaku os su vezani podaci o uzdužnom profilu terena, poprečnim profilima i slično (Korisnički priručnik PLATEIA 6.0). Prikaz uzdužnog profila prikazan je na **Slici 5**.

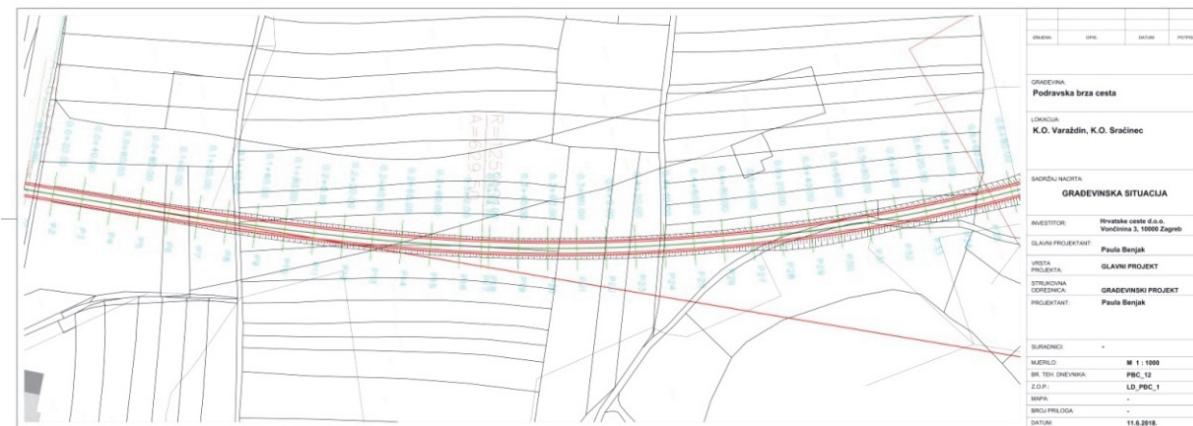
## 6.3. Uzdužni profil

Modul Uzdužni profil namijenjen je crtaju uzdužnih profila cesta, željeznica, vodotoka i omogućuje precizan i brz interaktivni unos linija terena i tangent, crtanje nivelete, proračun poprečnih nagiba na osnovi tlocrtog toka osi, proračun preslojavanja postojećih cesta i brzi proračun količina usjeka i nasipa (Korisnički priručnik PLATEIA 6.0). Prikaz uzdužnog profila prikazan je na **Slici 5**.

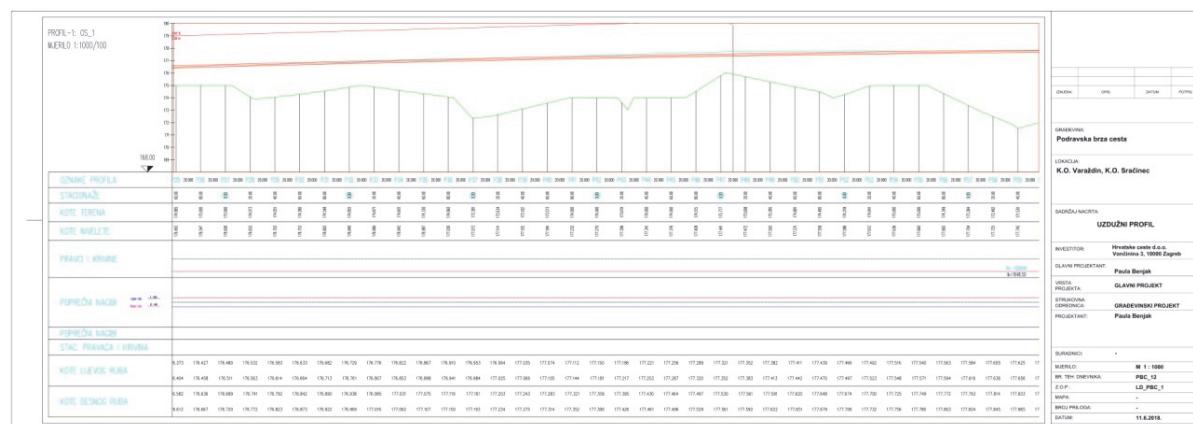
## 6.4. Poprečni profil

Modul Poprečni profil nudi automatizaciju obrade poprečnih profila i proračuna površina i volumena. Poprečne profile se može crtati u proizvoljnom horizontalnom i vertikalnom mjerilu što je iznimno važno kod projekata s zahtjevnim zemljanim radovima (Korisnički priručnik PLATEIA 6.0). Prikaz poprečnih profila prikazan je na **Slici 6**.

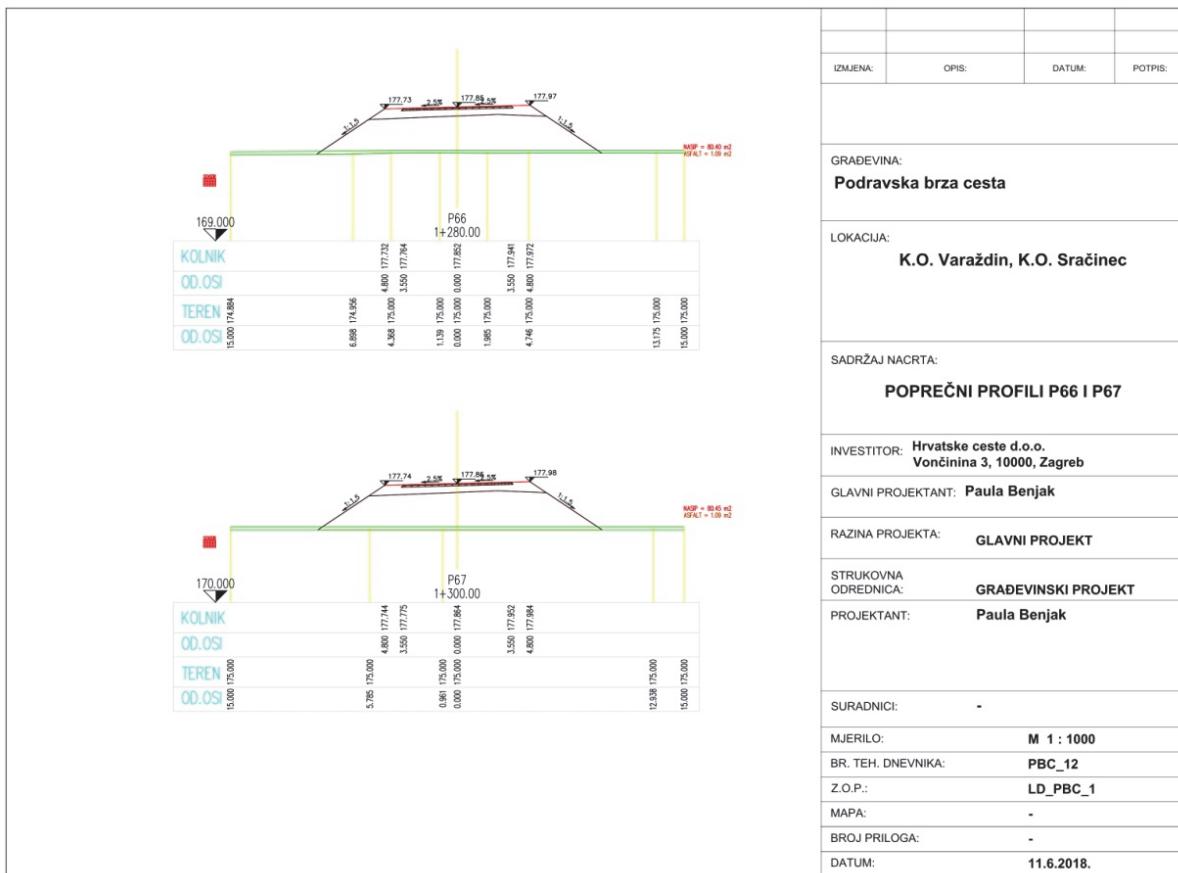
Također, u svim modulima programskog paketa Plateia, omogućeno je iznimno lako i automatsko ispisivanje crteža, što dodatno ubrzava postupke ispisa željenih crteža.



Slika 4. Građevinska situacija



Slika 5. Uzdužni profil



Slika 6. Poprečni profili

## 7. ZAKLJUČAK

U postupku ishodenja lokacijske dozvole potrebno je izdavanje lokacijske dozvole za građenje na zemljištu, odnosno građevini za koje investitor nije riješio imovinsko pravne odnose ili za koje je potrebno provesti postupak izvlaštenja. U radu su prikazani neki od bitnijih elemenata za ishodenje lokacijske dozvole, a uz teorijsku podlogu predložen je idejni projekt za ishodenje lokacijske dozvole Podravske brze ceste. Svi praktični dijelovi izrađeni su u programskom paketu Plateia, čiji moduli su također u radu detaljnije opisani. Također u radu su prikazani primjeri prijavnih listova i parcelacije u svrhu rješavanja imovinsko pravnih odnosa. Zbog ograničenja u pogledu veličine članku, u Prilozima su prikazani samo neki dijelovi uzdužnog i poprečnog profila.

## 8. LITERATURA

- Geoportal DGU. *DOF (Digitalni ortofoto), HOK (Hrvatska osnovna karta), TK (Topografske karte)*. Dostupno na:  
<https://geoportal.dgu.hr/#/menu/podaci-o-slojevima>  
 Korisnički priručnik PLATEIA 6.0, *Uzdužni profil*, STUDIO ARS Software, Matulji (2009)  
 Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja. *Lokacijska dozvola*. Dostupno na:  
<http://www.mgipu.hr/default.aspx?ID=17710>  
 Republika Hrvatska, Ured državne uprave u Varaždinskoj županiji. *Lokacijska dozvola*. Dostupno na:  
<http://uduvz.hr/lokacijska.htm>  
 Rezo, M., (2017): *Prometnice, predavanja*  
 Zakon.hr. *Zakon o prostornom uređenju*. Dostupno na: <https://www.zakon.hr/z/689/Zakon-o-prostornom-ure%C4%91enju>  
 Wikipedia. *Topografska karta*. Dostupno na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Topografska\\_karta](https://hr.wikipedia.org/wiki/Topografska_karta)

# USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA

## COMPARISON OF DIFFERENT METHODS FOR DETERMINING THE COEFFICIENT OF PERMEABILITY OF NON-COHESIVE SOIL

**Ivana Petrinjak<sup>1</sup>, Damir Štuhec<sup>1</sup>, Goran Jeftić<sup>1</sup>, Stjepan Strelec<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

\*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: pi2510@gfv.hr

**Sažetak:** Tečenje vode kroz tlo moguće je zbog postojanja povezanih šupljina koje se nalaze između čvrstih čestica tla. Mjera sposobnosti propusnog medija (tla) da propušta vodu definira se preko koeficijenta propusnosti. Sam pojam propusnosti se odnosi na lakoću kojom se bilo koji fluid kreće kroz određeni sloj. Kod ispitivanja vodopropusnosti tla obično se uzima da je voda taj fluid koji teče kroz tlo. Određivanje koeficijenta vodopropusnosti zahtijeva poznavanje odgovarajućih svojstava tla. Ona se određuju pomoću laboratorijskih ispitivanja koja obuhvaćaju granulometrijski sastav, oblik i veličina zrna, specifičnu gustoću čestica tla te poroznost i saturiranost. Koeficijent vodopropusnosti se u laboratoriju određuje ispitivanjem u permeametu, metodom stalnog ili promjenjivog potencijala i metodom zadanog protoka. U skladu s vrstom tla odabire se metoda i uređaj za ispitivanje vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti. U radu se uspoređuju rezultati određivanja koeficijenta vodopropusnosti pijeska korištenjem izravne metode mjerjenja u permeametu sa stalnim potencijalom, s rezultatima dobivenim primjenom različitih empirijskih metoda koje se temelje na svojstvima granulometrijske krivulje ispitivanog materijala.

**Ključne riječi:** propusnost tla, koeficijent vodopropusnosti, CHP (permeameter sa stalnim potencijalom), metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti.

**Abstract :** Cavities between solid particles of soil allow water flow through the soil. These cavities are interconnected, allowing the water to flow through them. The permeability of the permeable medium (soil) to leakage of water is defined by the permeability coefficient. The term permeability itself refers to the ease with which any fluid moves through a certain layer. When testing the water permeability of the soil, it is commonly assumed that water is the fluid flowing through the ground. Determination of the water permeability coefficient requires knowledge of soil properties. They are determined by laboratory tests that include granulometric composition, grain shape and size, specific soil particle density and porosity and saturation. The water permeability coefficient is determined by testing in the Constant Head Permeameter (CHP), Falling Head Permeameters (FHP) and flow-pump method. In accordance with the type of soil, a type of test method for water permeability coefficient is selected. In this final work, the results of the determination of the sand permeability coefficient are to be compared using the direct metering method in the constant permeameter, with the results obtained by applying different empirical methods based on the granulometric curve properties of the tested material.

**Keywords:** permeability, water permeability coefficient, CHP (Constant Head Permeameter), methods for determining the water permeability coefficient.

---

Received: 29.11.2018. / Accepted: 09.12.2018.

Published online: 17.12.2018.

---

Stručni rad / Technical paper

## 1. UVOD

Fizikalna svojstva tla su važna za njegovu propusnost. O složenosti građe tla i potrebne točnosti određivanja koeficijenta propusnosti zavisi i odabir ispitnih metoda. Ispitivanja se mogu izvoditi na terenu i u laboratoriju. S vremenom su razvijene posebne metode i uređaji za pripremu i ispitivanje hidrauličke vodljivosti na uzorcima tla u laboratoriju. Općenito, postoje tri metode ispitivanja koeficijenta propusnosti u laboratoriju – sa stalnom razlikom potencijala, s promjenjivom razlikom potencijala te zadanom protokom. Uređaji koji se koriste za ispitivanje zovu se permeametri. U ovom radu je posebno istaknuto ispitivanje koeficijenta propusnosti nekoherentnog tla pomoću permeametra sa stalnom razlikom potencijala. U slučaju nedostatka odgovarajućih ispitnih uzoraka tla, za procjenu koeficijenta propusnosti koriste se i neizravne, empirijske metode koje se temelje na karakteristikama granulometrijske krivulje nekoherentnog tla.

## 2. VODA U TLU

U troidjelnom sastavu tla voda ima značajan utjecaj na njegovo fizičko-mehaničko ponašanje. Počevši od kapilarnog dizanja i bubrenja, do tečenja vode niz kosine, kroz brane i ispod građevina, pa do dodatnih slijeganja građevina izazvanih razine podzemne vode, stabilnosti pijeska pri potresu i pojavi likvefakcije.

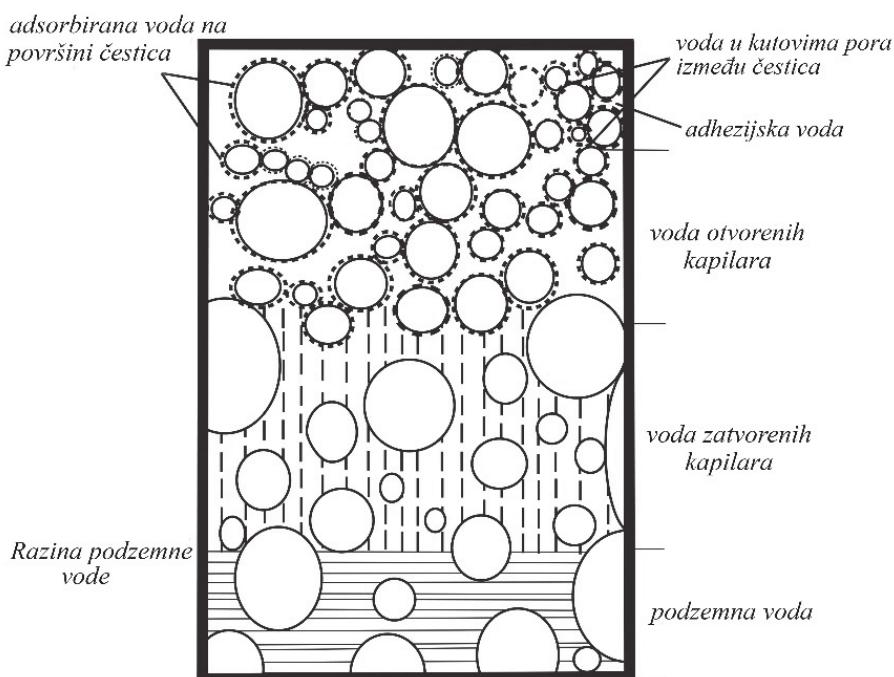
## 2.1. Oblici pojave vode u tlu

Promatrajući pore u tlu može se uočiti da one mogu biti djelomično ili potpuno ispunjene vodom. Kada je u tlu sav cjelokupni prostor šupljina, odnosno pora ispunjen vodom, u njemu djeluje hidrostatski tlak. Ovaj je prostor omeđen plohom koja se naziva razina podzemne vode (RPV). Na njoj je tlak jednak atmosferskom tlaku. U podzemnoj vodi je veći od atmosferskog. Iznad RPV nalazi se zona tla potpuno zasićenog vodom, u kojoj vlada negativni porni tlak (manji od atmosferskog), nastao pojavom kapilarnih sile između pora tla i vode. To je zona zatvorene kapilarne vode. Iznad zatvorene kapilarne vode nalazi se zona tla djelomično zasićena vodom u kojoj i dalje vladaju kapilarne sile. To je područje u kojem se nalazi otvorena kapilarna voda. Ako razina otvorene kapilarne vode ne seže do površine terena, u tom slučaju se iznad nje nalazi adhezijska voda. Područja pojave vode u tlu prikazana su u **Tablici 1**.

**Tablica 1. Područja pojave vode u tlu**

Adhezijska voda	Voda obavlja minerale tla u vrlo tankom sloju koji je vezan na mineral elektrokemijskim silama, nema kapilarnih učinaka.
Otvorena kapilarna voda	Na dodirima čestica postoje kapilarni meniskusi koji drže čestice zajedno, stupanj zasićenosti je bitno ispod 100%.
Zatvorena kapilarna voda	Porni tlak je negativan, stupanj zasićenosti blizu 100%.
Podzemna voda	Porni tlak je jednak hidrostatskom, a na razini podzemne vode jednak atmosferskom, stupanj zasićenosti je približno jednak 100%.

Na **Slici 1** dan je shematski prikaz pojave vode u tlu.



**Slika 1. Shematski prikaz vode u tlu**

## 2.2. Linearni zakon filtracije

Temeljni zakon koji opisuje laminarni tok vode u poroznoj sredini ustanovljen je empirijski (Darcy 1865.) i naziva se Darcyjev zakon. Francuski inženjer Henry Darcy ustanovio je da je strujanje vode kroz tlo analogno strujanju vode u cijevima. On je obavio niz ispitivanja na vertikalnoj cijevi koja je bila ispunjena pijeskom. Utvrdio je da je brzina toka kroz stupac zasićenog pijeska proporcionalna razlici hidrauličkog potencijala na krajevima stupca tj. obrnuto proporcionalna dužini stupca (**Slika 2**). Izraz (1) prikazuje Darcyjevu brzinu:

$$v = k \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (1)$$

gdje  $v$  predstavlja Darcyjevu brzinu toka,  $(h_1 - h_2)$  je razlika u hidrauličkom potencijalu,  $L$  je dužina linije toka od točaka na kojima su izmjerene vrijednosti  $h_1$  i  $h_2$ , a  $k$  je koeficijent propusnosti. Vrijednost  $v$  naziva se Darcyjevom brzinom toka zato što se pretpostavlja da do strujanja dolazi po čitavom materijalnom presjeku iako zapravo veliki dio tog presjeka zauzimaju krute čestice. Darcyjev eksperiment pokazuje da tok u zasićenom pijesku izravno ovisi o hidrauličkom gradijentu. Treba naglasiti da taj odnos vrijedi samo za laminarno strujanje. U slučaju turbulentnog strujanja, brzina strujanja ne mijenja se proporcionalno s hidrauličkim gradijentom. Razlika hidrauličkih potencijala  $(h_1 - h_2)$  podijeljena sa dužinom  $L$  tj. linijom tečenja, prikazanog **izrazom (2)** naziva se hidraulički gradijent  $i$ .

$$\frac{h_1 - h_2}{L} = i \quad (2)$$

Tako i specifičan protok  $q$  možemo izraziti (3):

$$\frac{Q}{A} = q = v = k \cdot i \quad (3)$$

Poznato je da je protok  $Q$  jednak umnošku brzine toka i površine presjeka  $A$ , ili:

$$Q = v \cdot A \quad (4)$$

Protok  $Q$  je količina istjecanja (volumena  $V$ ) u jedinici vremena  $t$ , a obično se izražava u kubnim metrima u sekundi [ $m^3/s$ ].

$$Q = \frac{V}{t} \quad (5)$$

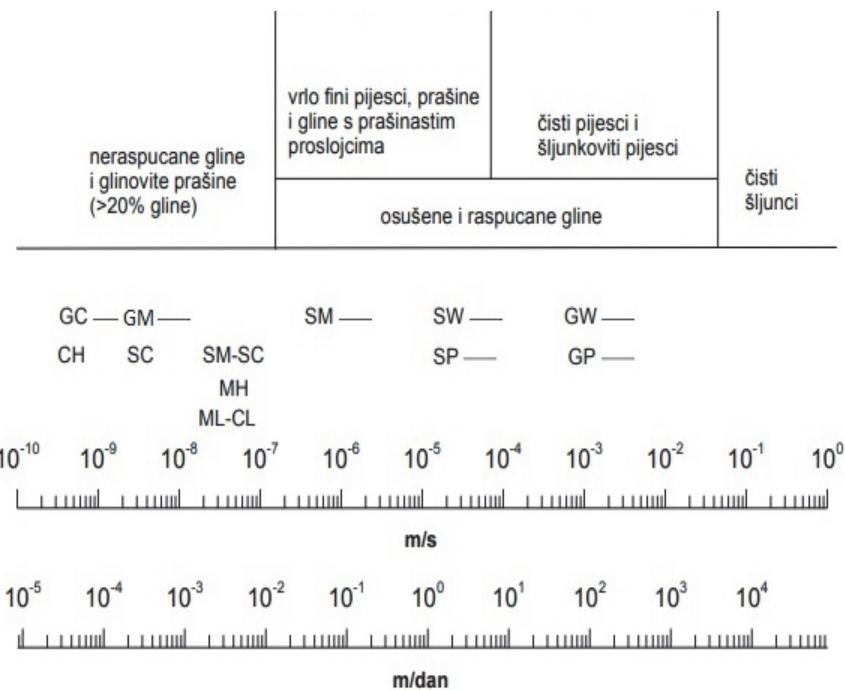
Kako je hidraulički gradijent bezdimenzionalna veličina, iz **izraza (2)** slijedi da koeficijent propusnosti ima dimenziju brzine, odnosno kada je hidraulički gradijent jednak jedinici, koeficijent propusnosti je jednak brzini filtracije.

### 2.3. Koeficijent propusnosti

Prema Darcyjevom zakonu, brzina strujanja vode kroz tlo  $v$  odnosno specifični protok  $q$  je proporcionalan hidrauličkom gradijentu, a konstantom proporcionalnosti se definira koeficijent propusnosti  $k$ . Navedeni izraz je prikazan **izrazom (6)**.

$$k = \frac{v}{i} \quad (6)$$

Koeficijent propusnosti ima dimenziju brzine, a najčešće se iskazuje u cm/s ili m/s. To je osnovni parametar za strujanje vode kroz tlo, a zavisno o vrsti tla varira u rasponu od preko 10 redova veličina. Niti za određenu vrstu tla koeficijent propusnosti nije konstantan, već zavisi o svojstvima poroznog medija.



Slika 2. Prikaz okvirnih vrijednosti koeficijenta propusnosti  $k$   
(prema Craig 1997; Mayne i dr. 2001)

Koeficijent propusnosti  $k$  zavisi o:

- veličini zrna
- koeficijentu pora
- obliku zrna, njihovoj raspodjeli i povezanosti, tj. o strukturi tla
- količini zraka u porama
- mineraloškom sastavu

Prema stupnju propusnosti određenom kroz vrijednosti koeficijenta propusnosti, tlo se može klasificirati na način prikazan u **Tablici 3.**

**Tablica 3. Klasifikacija tla prema propusnosti**

Stupanj propusnosti	Vrijednosti koeficijenta propusnosti $k$ [m/s]
Visoki	$> 10^{-3}$
Srednji	$10^{-3} - 10^{-5}$
Niski	$10^{-5} - 10^{-7}$
Vrlo niski	$10^{-7} - 10^{-9}$
Praktički nepropustan	$< 10^{-9}$

### 3. METODE ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI

U geotehničkom inženjerstvu se kao tekući medij pojavljuje podzemna voda pa se dalje razmatra koeficijent vodopropusnosti. Postoji više vrsta metoda za određivanje njegove vrijednosti, a najčešće korištene su:

1. terenske metode pokusnog crpljenja, gdje se određuje transmisivnost, a dijeljenjem s debljinom sloja određuje koeficijent propusnosti  $k$ ,
2. laboratorijske metode – pomoću raznih tipova permeametara,
3. metode koje se temelje na empirijskim izrazima uz korištenje podataka iz granulometrijskog sastava porozne sredine.

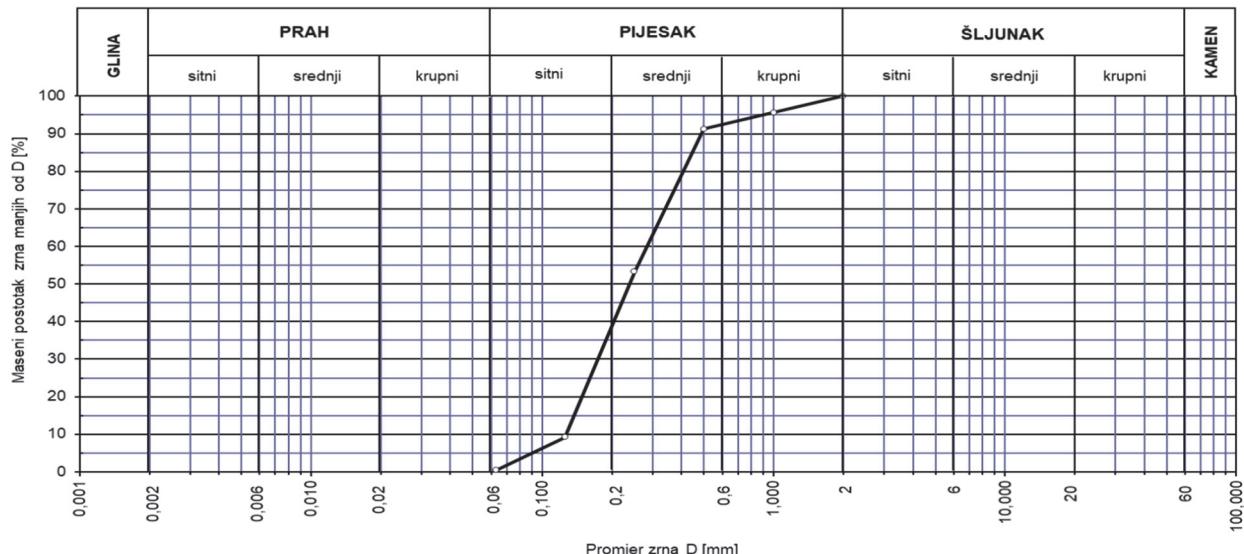
#### 3.1. Laboratorijske metode

Laboratorijskim metodama koeficijent vodopropusnosti se određuje pomoću permeametara, za što se koriste neporemećeni ili poremećeni (najčešće kompaktirani) uzorci tla. Pri određivanju koeficijenta propusnosti uzorci se podvrgavaju toku koji se može odvijati pri stalnoj razlici potencijala (permeametar sa stalnim potencijalom) ili toku s promjenjivom razlikom potencijala (permeametar s promjenjivim potencijalom). Za dobro propusne materijale ( $k > 10^{-5}$  m/s) koristi se permeametar sa stalnim potencijalom dok se za slabo propusne materijale ( $k < 10^{-5}$  m/s) koristi permeametar s promjenjivim potencijalom. U oba slučaja voda se može dodavati bilo na vrh, bilo na dno uzorka, pa tok može biti silazni ili uzlazni. Uzorak obično ima oblik pravilnoga kružnog cilindra, a smješten je između dviju poroznih ploča. Prije ispitivanja, uzorak mora biti potpuno saturiran vodom i ne smije sadržavati mjehuriće zraka, kako bi se minimizirali njegovi negativni učinci na rezultate mjerena. Pri laboratorijskome određivanju koeficijenta propusnosti pomoću permeametara, pojavljuju se brojne zadaće u dobivanju pouzdanih rezultata pa treba voditi računa o slijedećim ograničenjima:

- Tla su u prirodi obično uslojena pa je u laboratoriju zahtjevno simulirati stvarne terenske uvjete.
- U pijesku su  $k_v$  i  $k_h$  međusobno različitih vrijednosti, reda veličine  $k_h = (10 - 1000) k_v$ . Pri uzimanju uzorka nepovratno se gube prirodni uvjeti, u ovom slučaju navedeni odnosi vrijednosti koeficijenata u dva smjera.
- Male dimenzije terenskih uzorka dovode do djelovanja rubnih uvjeta, poput tečenja uz glatke strane cilindra i stvaranja mjehurića zraka u vodi ili u obliku zamki zraka u uzorku, što može imati zamjetan učinak na rezultate.
- Metode mjerena permeametrom odvijaju se samo u saturiranim uvjetima.
- Kada je  $k$  malen, reda veličine  $10^{-7}$  do  $10^{-11}$  m/s, vrijeme potrebno za testiranje lako može uzrokovati evaporaciju i procurivanje opreme, što dovodi do pogreške u veličini hidrauličke vodljivosti  $k$  za nekoliko redova veličine.
- Zbog trajanja testa, obično se primjenjuje puno veći hidraulički gradijent nego što je u prirodi.
- U pijesku nerealno visok hidraulički gradijent može stvarati turbulencije, dakle okolnosti toka različite od terenskih pod kojima se odvija laminarni tok. Nerealno visok hidraulički gradijent može dovesti do konsolidacije i poroznosti koja je različita od prirodne poroznosti uzorka.

#### 4. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI U LABORATORIJU

Uzorak pjeska za laboratorijsko ispitivanje osušen je do stalne mase i prema normi HRN EN ISO 17892-4 određen mu je granulometrijski sastav prikazan na **Slici 3**. Iz granulometrijske krivulje očitani su karakteristični promjeri zrna i izračunati koeficijent jednoličnosti i koeficijent zakrivljenosti. Granulometrijski sastav i karakteristična svojstva uzorka prikazana su u **Tablici 4**.



**Slika 3. Granulometrijska krivulja ispitivanog uzorka pjeska**

**Tablica 4. Granulometrijski sastav i karakteristična svojstva uzorka**

Granulometrijski sastav	
Veličina zrna [mm]	Udio u ukupnoj masi materijala [%]
2 – 1	4,37
1 – 0,5	4,40
0,5 – 0,25	38,00
0,25 – 0,125	44,03
0,125 – 0,063	8,77
< 0,063	0,43
Karakteristični promjeri zrna	
$D_{10}$	0,1266 mm
$D_{17}$	0,1391 mm
$D_{30}$	0,1734 mm
$D_{50}$	0,2376 mm
$D_{60}$	0,2828 mm
Oblik zrna	
Zaobljen do poluzaobljen	
Svojstva granulometrijske krivulje za ocjenu graduiranosti	
$C_U$	2,23
$C_C$	0,84
USC klasifikacija	SP

#### 4.1. Određivanje koeficijenta vodopropusnosti u permeametu sa stalnim potencijalom

Ispitivanje je provedeno prema ispitnoj normi *BS 1377:1990: Part 5-clause 5*. Norma nalaže da se iz uzorka moraju ukloniti sva zrna veća od 1/12 promjera čelije permeametra i da u uzorku ne mijes biti više od 10% čestica manjih od  $63\mu\text{m}$ . Korišten je permeametar standardiziranih dimenzija, opremljen manometarskim cijevima koje tijekom ispitivanja omogućuju kontrolu ujednačenosti protjecanja vode kroz uzorak i mjerjenje piezometarske visine stupca vode, kao i sustavom za mijenjanje hidrauličkog gradijenta. Osim mjerena razlika piezometarske visine za svaku promjenu hidrauličkog gradijenta i duljine uzorka, mjerilo se i vrijeme potrebno da kroz uzorak prođe voda odabranog volumena.

#### 4.2. Ugradnja, priprema i ispitivanje uzorka

Prije ugradnje u čeliju permeametra, potrebna masa suhog uzorka najprije je dobro homogenizirana. Kako bi se prilikom saturacije izbjegli mjeđuhrići zraka u uzorku i dobila podjednaka gustoća saturiranog uzorka u rahlom stanju, ugradnja uzorka izvedena je pod vodom (**Slika 4**). Ugrađeni uzorak pjeska je normiranim postupkom saturiran, a preljevni spremnik s vodom podignut na visinu potrebnu za postizanje želenog hidrauličkog gradijenta. Nakon toga izvedena su mjerena koeficijenta vodopropusnosti sa silaznim tokom vode, pod različitim vrijednostima hidrauličkog gradijenta (**Slika 5**). Tijekom ispitivanja vodilo se računa da je hidraulički gradijent pokriva područje laminarnog tečenja vode kroz uzorak, koje vlada sve dok je omjer između protoka i hidrauličkog gradijenta linearan.



*Slika 4. Ugradnja uzorka pod vodom*



*Slika 5. Merenje koeficijenta vodopropusnosti u čeliji permeametra*

#### 4.3 Obrada rezultata mjerena i računanje koeficijenta vodopropusnosti

Kod pripreme i ugradnje uzorka u čeliju permeametra izvedena su mjerena pomoću kojih se mogu izračunati određena fizikalna svojstva uzorka i dimenzije same čelije potrebne za računanje koeficijenta vodopropusnosti. Obrađeni rezultati mjerena prikazani su u **Tablici 5**.

**Tablica 5. Dimenzije čelije permeametra i fizikalna svojstva ugrađenog uzorka**

Promjer čelije permeametra	11,4 cm
Površina poprečnog presjeka čelije permeametra	102,07 $\text{cm}^2$
Visina uzorka u čeliji permeametra	33,3 cm
Suha masa ugrađenog uzorka	5250 g
Volumen ugrađenog uzorka	3398,94 $\text{cm}^3$
Suha gustoća uzorka	1,55 $\text{g}/\text{cm}^3$
Gustoća čvrstih čestica uzorka (ispitana)	2,7 $\text{g}/\text{cm}^3$
Porozitet ugrađenog uzorka	42,6 %

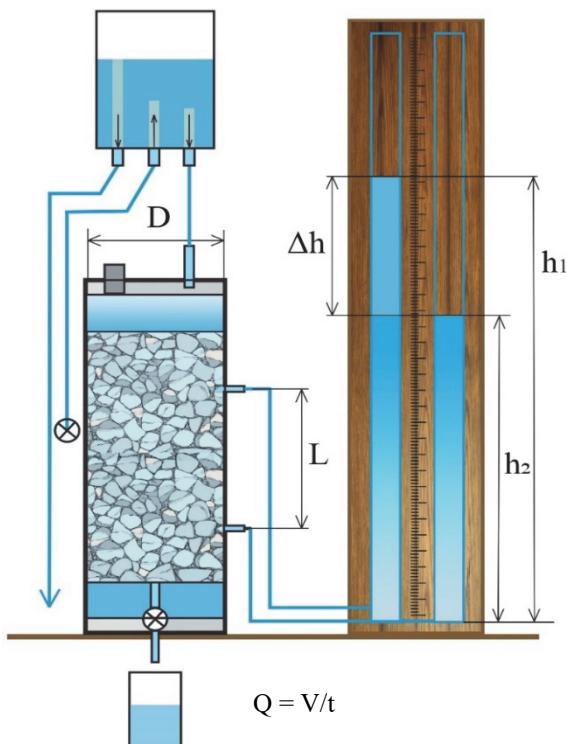
Vrijednost koeficijenta vodopropusnosti  $k$  određuje se u laboratorijskim uvjetima za temperaturu vode 20°C prema izrazu (7) gdje je  $Q$  protok vode odnosno volumen vode protekli kroz uzorak u nekom vremenu,  $i$  je hidraulički gradijent,  $R_T$  faktor temperaturne korekcije zbog dinamičke viskoznosti vode za korekciju  $k$  na referentnu temperaturu od 20°C,  $A$  je površina poprečnog presjeka uzorka.

$$k = \frac{Q}{i} \cdot \frac{R_T}{A} \quad (7)$$

Hidraulički gradijent  $i$  kao i duljina uzorka  $L$  računati su između najvišeg i najnižeg manometarskog priključka prema izrazu (8), a temperaturna korekcija  $R_T$  može se procijeniti iz odgovarajućeg grafičkog prikaza ili se računa prema izrazu (10) gdje je  $\mu_T$  dinamička viskoznost vode na temperaturi mjerjenja, te  $\mu_{20^\circ C}$  dinamička viskoznost vode na 20°C. Shema permeametra sa stalnim potencijalom i odgovarajućim oznakama prikazana je na Slici 6. Rezultati mjerjenja koeficijenta vodopropusnosti u permeametu prikazani su u Tablici 6.

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (8)$$

$$R_T = \frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ C}} \quad (9)$$



Slika 6. Shema permeametra sa stalnim potencijalom

Tablica 6. Rezultati mjerjenja koeficijenta vodopropusnosti

Visina vode u manometru [cm]		$\Delta h$ [cm]	L [cm]	i [1]	V [cm³]	t [s]	Q [cm³/s]	T [°C]	$R_T$ [1]	$k_{20^\circ C}$ [cm/s]
$h_1$	$h_2$									
11,4	22,6	11,2	9	1,24	153	60	2,55	23	0,9307	$1,88 \times 10^{-2}$
11,2	22,2	11,0	9	1,22	152	60	2,53	23	0,9307	$1,89 \times 10^{-2}$
10,1	20,5	10,4	9	1,16	143	60	2,38	22	0,9505	$1,91 \times 10^{-2}$
10,6	21,4	10,8	9	1,20	144	60	2,40	22	0,9505	$1,86 \times 10^{-2}$
11,1	21,8	10,7	9	1,19	145	60	2,42	22	0,9505	$1,89 \times 10^{-2}$
11,4	22,0	10,6	9	1,18	143	60	2,38	21	0,9703	$1,92 \times 10^{-2}$

Iz rezultata mjerjenja vidljivo je da su protoci vode kroz uzorak kao i hidraulički gradjenti bili ujednačeni, a njihov odnos linearan, što potvrđuje da je tok vode kroz uzorak bio laminaran. Zamjetan je i učinak promjene temperature vode zbog utjecaja na smanjenje njezine dinamičke viskoznosti. Rezultati mjerjenja svedeni na referentnu temperaturu od 20°C za laboratorijska ispitivanja dali su ujednačene i bliske vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti, pa se kao konačni rezultat može usvojiti srednja vrijednost svih mjerjenja koja iznosi  $k_{20^\circ\text{C}} = 1,89 \pm 0,03 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ .

## 5. PROCJENA KOEFICIJENATA VODOPROPUSNOSTI POMOĆU EMPIRIJSKIH IZRAZA

Za procjenu koeficijenta vodopropusnosti iz granulometrijskog sastava nekoherentnog tla (šljunak i pjesak), razvijeni su mnogobrojni empirijski postupci. Svi oni se temelje na svojstvima poroznog medija (tla) kroz koji teče neka tekućina ali i njenim fizikalnim svojstvima. U geotehničkoj praksi ta tekućina je voda. Mnogi autori razvili su empirijske metode samo za određene vrste nekoherentnih tala, uglavnom pjeske, za određeni raspon veličina efektivnih promjera zrna, njihovih oblika i poroznosti. Za relativno pouzdanu procjenu koeficijenta vodopropusnosti pomoću empirije, neophodno je pravilno odabrati onaj empirijski postupak koji najbolje odgovara svojstvima granulometrijske krivulje čija se propusnost procjenjuje. U praksi se obično koristi nekoliko odgovarajućih postupaka čiji se rezultati mogu uspoređivati pa i statistički obrađivati.

U ovom radu, za procjenu koeficijenta vodopropusnosti korišteni su empirijski izrazi čije su uvjete primjene zadovoljavala svojstva granulometrijskog sastava ispitivanog materijala. To su izrazi prema autorima: Hazen, Beyer, Sauerbrei, Terzaghi, Kozeny-Carman (modificirani) i Seelheim. Odabранe empirijske metode usklađene su u fizikalnim jedinicama i pri procjeni koeficijenta vodopropusnosti uzimaju u obzir svojstva tekućine odnosno vode na temperaturi 20°C.

Porozitet tla ima značajan utjecaj na njegovu propusnost, ali se sijanjem poremećenih uzoraka nekoherentnih tala ne može izravno odrediti. Da bi se ovaj parametar tla ipak mogao koristiti u nekim empirijskim izrazima, predlaže se (Vuković & Soro 1992) [10] računanje poroziteta prema **izrazu (10)**:

$$\mathbf{n} = 0,255(1 + 0,83^{C_U}) \quad (10)$$

gdje je  $C_U$  koeficijent jednoličnosti, izračunat iz svojstava granulometrijske krivulje.

Općenito se empirijske jednadžbe za procjenu koeficijenta vodopropusnosti mogu napisati u obliku (11):

$$\mathbf{k} = \frac{g}{v} \mathbf{C}[f(\mathbf{n})] d_e^2 \quad (11)$$

Autor	Vrijednost $C$	Funkcija poroznosti $n$	Efektivni promjer zrna $d_e$	Područje primjene
Hazen	$6 \times 10^{-4}$	$[1 + 10(n - 0,26)]$	$d_e = d_{10}$	$0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}$ $C_U < 5$
Beyer	$6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{C_U}$	1	$d_e = d_{10}$	$0,06 \text{ mm} < d_e < 0,6 \text{ mm}$ $1 < C_U < 20$
Sauerbrei	$3,75 \times 10^{-3}$	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	$d_e = d_{17}$	Pjesak i pjeskovita glina, $d < 0,5 \text{ mm}$
Terzaghi	$10,7 \times 10^{-3}^{(1)}$ $6,1 \times 10^{-3}^{(2)}$	$\left( \frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2$	$d_e = d_{10}$	Krupni pjesak zaobljenih <sup>(1)</sup> do uglatih <sup>(2)</sup> zrna
Kozeny – Carman (modificirani)	$1,99 \times 10^{-4}$	$\frac{e^3}{1 + e}$	$\left( \frac{d_{10}^2}{180} \right)$	$d_e < 3 \text{ mm}$
Seelheim	$3,57 \times 10^{-3}$	1	$d_e = d_{50}$	Pjesak i glina

Koristeći izraze navedenih autora, izračunati su koeficijenti vodopropusnosti. Odabrani izrazi bili su odgovarajući za procjenu koeficijenta vodopropusnosti ispitivanog pjeska jer su svojstva njegove granulometrijske krivulje zadovoljavala uvjete za primjenu pojedine metode u pogledu veličine efektivnog zrna i koeficijenta jednoličnosti. Radi usporedbе rezultata, svi su koeficijenti vodopropusnosti korigirani na laboratorijsku referentnu temperaturu vode od 20°C. Računski procijenjene vrijednosti koeficijenata

vodopropusnosti iskazane su brojčano s jednim cijelim i jednim decimalnim mjestom te pripadajućim eksponentom, a zbirno su prikazane u **Tablici 7**.

**Tablica 7. Zbirni prikaz koeficijenata vodopropusnosti prema empirijskim izrazima**

Autor	Koeficijent vodopropusnosti $k_{20^\circ\text{C}}$ [cm/s]
Hazen	$2,5 \times 10^{-2}$
Beyer	$2,2 \times 10^{-2}$
Sauerbrei	$1,7 \times 10^{-2}$
Terzaghi	$1,9 \times 10^{-2}$
Kozeny - Carman	$2,1 \times 10^{-2}$
Seelheim	$2,0 \times 10^{-2}$

Empirijski izrazi daju samo procjenu koeficijenta vodopropusnosti jer s u njima ne mogu simulirati svi uvjeti koji utječu na propusnost tla. Zato se u praktičnoj primjeni koristi više odgovarajućih izraza, a za konačnu procjenu obično se usvaja njihova srednja vrijednost. Iz **Tablice 7** je vidljivo da su procijenjene vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti prilično konzistentne, a njihova srednja vrijednost iznosi  $k_{20^\circ\text{C}} = 2,1 \pm 0,04 \times 10^{-2}$  cm/s.

## 6. USPOREDBA VRIJEDNOSTI KOEFICIJENATA VODOPROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA DOBIVENIH RAZLIČITIM METODAMA ODREĐIVANJA

Koeficijent vodopropusnosti kao vrlo važan parametar tla, može se odrediti izravnim i neizravnim postupcima. Kad god to okolnosti dozvoljavaju, treba u praksi koristiti izravne metode određivanja, pri čemu je prednost na strani terenskih metoda u odnosu na laboratorijske. Kad izravne metode određivanja iz nekog razloga nisu dostupne ili nisu primjenjive, kao zamjena za procjenu koeficijenta vodopropusnosti mogu se koristiti empirijske metode. Kod toga pažnju treba posvetiti odabiru empirijskih izraza koje moraju biti adekvatni za određeni granulometrijski sastav nekoherentnog tla. Usporedba rezultata između opisanih metoda prikazana je u **Tablici 8**.

**Tablica 8. Usporedba koeficijenata vodopropusnosti**

Koeficijent vodopropusnosti određen u permeametu sa stalnim potencijalom	$k_{20^\circ\text{C}} = 1,9 \pm 0,03 \times 10^{-2}$ cm/s
Koeficijent vodopropusnosti procijenjen empirijskim metodama	$k_{20^\circ\text{C}} = 2,1 \pm 0,04 \times 10^{-2}$ cm/s

Međusobna usporedba koeficijenata vodopropusnosti odnosi se na njihove srednje vrijednosti, dobivene različitim metodama određivanja. Primjetno je dobro podudaranje rezultata, koje se međusobno razlikuje oko 10 % unutar istog reda veličine. Za praktičnu primjenu u većini geotehničkih zahvata, to je sasvim prihvatljivo odstupanje. Podudarnost rezultata ostvarena je pravilnim odabirom empirijskih metoda za procjenu koeficijenta vodopropusnosti ali i pažljivom ugradnjom uzorka u čeliju permeametra. Poznato je da porozitet značajno utječe na propusnost tla pa je mogao imati jak učinak na određivanje vrijednost koeficijenta vodopropusnosti. Da bi fizikalna svojstva pijeska ispitivanog u permeametu bila što bliža procijenjenim svojstvima u empirijskim izrazima, uzorak se u čeliju permeametra uspio ugraditi s gotovo istom vrijednosti poroziteta koja je izračunata iz svojstava granulometrijske krivulje pijeska. Tako izračunati porozitet iznosi 42,3 %, dok porozitet ugrađenog pijeska iznosi 42,6 %. Analizirajući rezultate procjene koeficijenta vodopropusnosti empirijskim metodama, zanimljivo je da je izraz po Terzaghi-ju za krupni pijesak zaobljenog zrna dao vrijednost koeficijenta vodopropusnosti identičnu onoj iz eksperimentalnog određivanja u permeametu, dok je izraz prema Hazenu dao vrijednost koeficijenta vodopropusnosti s najvećim odstupanjem od vrijednosti dobivenoj u permeametu.

## 7. ZAKLJUČAK

Na uzorku pijeska zaobljenih do poluzaobljenih zrna veličine 2 – 0,06 mm napravljena je granulometrijska analiza te izrađena kumulativna granulometrijska krivulja iz koje su isčitane vrijednosti efektivnih veličina koje služe kao ulazni parametri za određivanje koeficijenta vodopropusnosti. Također je izračunat koeficijent jednoličnosti pomoću kojeg se određuje pogodnost primjene pojedine empirijske metode za procjenu

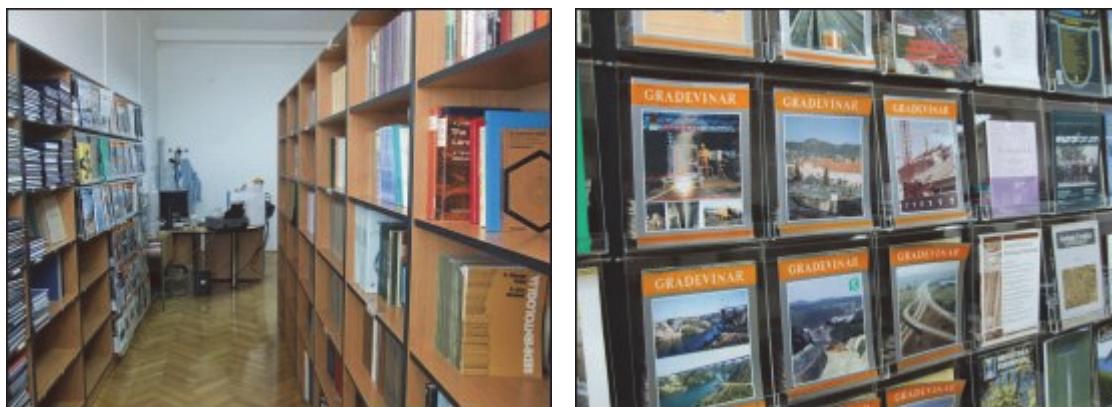
vodopropusnosti nekoherentnog tla. Na ispitnom uzorku je laboratorijskim mjerjenjem u permeametu sa stalnim potencijalom određena vrijednost koeficijenta vodopropusnosti. U rezultate ispitivanja uključene su i empirijske metode, gdje se dobiveni rezultati značajno poklapaju s laboratorijskim ispitivanjima.

Srednja vrijednost koeficijenta vodopropusnosti procijenjena empirijskim izrazima za temperaturu vode od  $20^{\circ}\text{C}$  iznosila je  $k_{sr} = 2,1 \times 10^{-2}$  cm/s, dok je kod mjerjenja permeometrom sa stalnim potencijalom, također srednja vrijednost koeficijenta vodopropusnosti, pri istoj temperaturi vode iznosila  $k_{sr} = 1,9 \times 10^{-2}$  cm/s. Na podudarnost rezultata utjecala je pravilna ugradnja uzorka u čeliju permeometra kao i odgovarajući odabir empirijskih izraza za procjenu koeficijenta vodopropusnosti. Obzirom da koeficijent vodopropusnosti zavisi o veličini i obliku zrna, koeficijentu pora i viskozitetu vode, poznavanjem i kontrolom navedenih čimbenika postignuti su ujednačeni uvjeti pri određivanju njegove vrijednosti različitim metodama ispitivanja. Određivanjem koeficijenta vodopropusnosti izravnim laboratorijskim metodama moguće je bolje simulirati uvjete tečenja vode „in situ“ (hidraulički gradijent, porozitet, vrstu tečenja, oblik zrna) u odnosu na empirijske metode pa im u praktičnoj primjeni treba dati prednost. Izravne metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti na terenu daju najtočnije rezultate, ali traju dulje te zahtijevaju angažiranje značajnije opreme, ljudi i financijskih sredstva. Kada to nije moguće osigurati, laboratorijske i empirijske metode predstavljaju prihvatljivu alternativu.

## 8. LITERATURA

- Roje-Bonacci T., Mehanika tla. 2. dopunjeno i izmijenjeno izdanje. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, IGH d.d. Zagreb, Geotehnički fakultet: Varaždin; Split 2003.
- Pollak Z., Hidrogeologija za građevinare. Poslovna knjiga – Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku; Zagreb 1995.
- Perčel B., Mehanika Tla 1. dio. Viša Geotehnička škola: Varaždin, RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; Varaždin, ožujka 1975.
- Bačani, A., Hidrogeologija I. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; 2006.
- Miletić P., Heinrich Miletić M., Uvod u kvantitativnu hidrogeologiju. RGN – fakultet Sveučilišta u Zagrebu – OOUR studija geotehnike Varaždin i Nišro Varaždin; Varaždin 1981.
- Roje-Bonacci T., Zemljani radovi. Sveučilište u Splitu, fakultet Građevinarstva, Arhitekture i Geodezije; Split 2007.
- Nonveiller E., Mehanika tla i temeljenje građevina. Školska knjiga; Zagreb 1979.
- Žugaj R., Hidrologija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb 2000.
- Strelec S., Štuhec D., Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi, Interna skripta, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2011.
- Michael Kasenov, Pd.D., Determination of hydraulic conductivity from grain size analysis, Included Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition, by Vuković, M., Soro A., Water Resources Publications, LLC, 2010.
- Szavits-Nossan V., Voda u tlu. članak, dostupno na:  
[https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/Voda\\_u\\_tlu.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Voda_u_tlu.pdf)
- Kvasnička P., Domitrović D., Mehanika tla. Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb, 2007. dostupno na: [http://rgn.hr/~pkvasnic/MehanikaTla\\_2007.pdf](http://rgn.hr/~pkvasnic/MehanikaTla_2007.pdf)
- Urumović. K., Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb, 2003.
- Vienken, T., Dietrich, P., Field evaluation of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data, Journal of Hydrology 400 (2011), pg. 58-71, Elsevier, dostupno na journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)
- HRS CEN ISO/TS 17892-4:2008, Geotehničko istraživanje i ispitivanje-Laboratorijsko ispitivanje tla – 4. dio: Određivanje granulometrijskog sastava (ISO/TS 17892-4:2004; CEN ISO/TS 17892-4:2004)
- BS 1377:1990-Part 5, Method of test for soil for civil engineering purposes, compressibility, permeability and durability tests
- Kevrić K., Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeometra sa stalnom razinom na vodocrpilištu Švarča. diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb 2017.
- Szavits-Nossan V., Mehanika tla i stijena, strujanje vode kroz tlo. članak, dostupno na:  
[https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/5.\\_Predavanje\\_MT.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/5._Predavanje_MT.pdf)
- Veinović Ž., Kovačević-Zelić B., Kvasnička P., Laboratorijsko mjerjenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda. članak, str. 95-102, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol.15 No.1; Prosinac 2003., dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/13393>

## Knjižnica Geotehničkog fakulteta



### Izдавачka djelatnost

#### Sveučilišni udžbenici

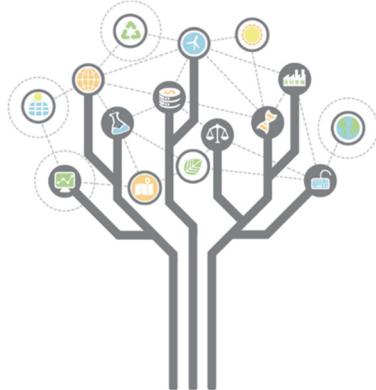


#### Časopis „Inženjerstvo okoliša“





STUDIJ  
INŽENJERSTVA  
OKOLIŠA



Lajkaj nas na Fejsu

**BESTSDI Project Objectives**

The wider objectives of the BESTSDI project is to improve the quality of higher education in Geographical Science and Technology field, SDI and geodesy, enhance its relevance for the labour market and society and to improve the level of competences and skills in HEI's by developing new and innovative education programmes within the field of SDI. These wider objectives are fully compliant with the priorities of the Capacity Building projects within the Erasmus+ program. The specific project objectives are to develop, test and adapt new curricula, courses, learning

**BESTSDI Expected Results**

To develop appropriate curricula, courses and their content for both target groups (SDI providers and SDI users) of academic institutions. This includes the development of:

- SDI compulsory course for undergraduate study programs in geodesy
- SDI modules for graduate study programs in geodesy and geoinformatics
- SDI user course components for undergraduate study programs of partner faculties
- SDI elective courses for graduate study program of partner faculties (SDI users)
- Development of sustainable training courses (life-long education) of broad scope of professionals.

**Additional benefits:**

- New level of communication and cooperation among the partner universities with the emphasis on SDI but expanding it on institutional and project cooperation.
- Exchange of students and staff will be fostered through the project activities and information about activities conducted by the partners communicated among the partner universities.

**BESTSDI Partners**

Coordinator: University of Zagreb, Faculty of Geodesy, Croatia

Partner: University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering, Croatia

**Other Partners:**

Katholieke Universiteit Leuven (Catholic University of Leuven), Belgium

Sveučilište u Splitu (University of Split), Croatia

Univerzitet "Sv. Kiril i Metodij" Skopje (Ss. Cyril and Methodius University in Skopje), Macedonia

Hochschule Bochum (Bochum University of Applied Sciences), Germany

Universiteti Politekniki i Tiranës (Polytechnic University of Tirana), Albania

Universiteti Bujqesor i Tiranes (Agricultural University of Tirana), Albania

Univerzitet u Banjoj Luci (University of Banja Luka), Bosnia and Herzegovina

Sveučilište u Mostaru (University of Mostar), Bosnia and Herzegovina

Univerzitet u Sarajevu (University of Sarajevo), Bosnia and Herzegovina

Javna Ustanova Univerzitet u Tuzli Universitas Studiorum Tuzla (University of Tuzla), Bosnia and Herzegovina

Universiteti Nderkombetar per Biznes dhe Tehknologji UBT (University for Business and Technology), Kosovo

Javna ustanova Univerzitet Crne Gore Podgorica (University of Montenegro), Montenegro

Unvierzitet u Beogradu (University of Belgrade), Serbia

Univerzitet u Novom Sadu (University of Novi Sad), Serbia

Universiteti "Ukshin Hoti" ne Prizren (University of "Ukshin Hoti" in Prizren), Kosovo

**Associated Partners:**

Republic Administration for Geodetic and Property Affairs of Republika Srpska, BiH

Federal Administration for Geodetic and Property Affairs of Federation of Bosnia and Herzegovina, BiH

Agency for Real Estate Cadastre, Macedonia

**Subcontractors:**

Lantmäteriet (Swedish National Mapping and Cadastre Authority), Sweden

Novogit AB, Sweden

## USPOSTAVNI ISTRAŽIVAČKI PROJEKT

# ISPITIVANJE I MODELIRANJE MEHANIČKOG PONAŠANJA BIOOSUŠENOG OTPADA KAO PREDUVJET ENERGETSKE OPORABE - WtE

Projekt je primarno orientiran na detaljno eksperimentalno ispitivanje i numeričko modeliranje mehaničkog ponašanja bioosušenog otpada.

Biosušenje je varijacija aerobne razgradnje koja se primjenjuje za parcijalnu stabilizaciju komunalnog otpada.

Nakon biosušenja, otpad se upućuje u daljnju mehaničku rafinaciju gdje se izdvaja organski bogata sitnozrnata frakcija koja je pogodna za odlaganje na bioreaktorsko odlagalište.

Jednom odložena, ova se frakcija ponovno podvrgava postupku vlaženja, s ciljem intenziviranja procesa razgradnje i proizvodnje bioplina.

Proizvedeni biopljin potom se može iskoristiti za energetsku uporabu kroz proizvodnju topinske i/ili električne energije.

Trenutno u Republici Hrvatskoj postoje dva funkcionalna MBO postrojenja s tehnološkim procesom obrade čiji je izlazni proizvod pogodan za odlaganje na bioreaktorsko odlagalište.

Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 114/15) prepoznaže bioreaktorsko odlagalište kao odlagalište otpada za neopasni otpad - podkategorija 1.

Unatoč tome što su u RH bioreaktorska odlagališta dozvoljena i već postoje postrojenja čiji je izlazni produkt pogodan za energetsku uporabu, u RH trenutno ne postoji niti jedno bioreaktorsko odlagalište.



Hrvatska zadruga  
za znanost

**Trajanje projekta: 01.01.2018. – 31.12.2022.**

**Iznos financiranja: 920.000,00 kuna**

**Web stranica projekta: [wte.gfv.hr](http://wte.gfv.hr)**

Kao jedan od razloga ovakvoj situaciji svakako se može istaknuti nedovoljan broj eksperimentalnih podataka o geotehničkim parametrima sitnozrnate frakcije bioosušenog MBO otpada.

Drugi razlog je nedostatak prikladnog numeričkog modela za ovu vrstu otpada.

Uslijed ovih nedostataka projektiranje bioreaktorskog odlagališta nije moguće.

Stoga je glavni cilj novog istraživanja, na temelju utvrđenih eksperimentalnih podataka, razviti prikladan konstitutivni model za opisivanje 3-D stanja naprezanja i deformacija sitnozrnate frakcije bioosušenog otpada.

Razvijeni model tada bi se mogao koristiti za potrebe projektiranja bioreaktorskih odlagališta ne samo u RH već i u drugim zemljama regije kod kojih MBO tehnologija tek treba biti implementirana.



Stjecanjem ekspertize u provođenju pokusa i numeričkom modeliranju bioosušenog otpada na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu omogućit će se otvaranje specifičnog područja istraživanja, visoko komplementarnog s postojećim istraživačkim iskustvom u Hrvatskoj.

Rezultati ovog projekta dozvolut će racionalniji pristup u projektiranju odlagališta otpada.

Osim toga, rezultati pokusa će pružiti sveobuhvatan skup dobro kontroliranih, novih generičkih mjerila za računalnu validaciju različitih aspekata modeliranja MBO otpada te doprinijeti unaprjeđenju njegove prediktivne snage za potrebe projektiranja odlagališta otpada.

Cilj projekta je stvoriti specifičnu i dugoročnu istraživačku nišu za Eksperimentalni i numerički laboratorij na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, u suradnji s centrom izvrsnosti u Austriji.

Spomenuta suradnja temelji se na višegodišnjoj ekspertizi u području numeričkog modeliranja profesora Ericha Bauera s Tehničkog sveučilišta u Graz-u.

**Voditelj projekta: izv. prof. dr. sc. Igor PETROVIĆ, Geotehnički fakultet**

**Suradnici:**

- Erich BAUER, Dipl.-Ing. Dr.techn., habil., ao.Univ.-Prof., Institute of Applied Mechanics, Graz University of Technology, Austria
- Doc.dr.sc. Ivan HIP, Geotehnički fakultet
- Doc.dr.sc. Anita PTIČEK SIROČIĆ, Geotehnički fakultet
- Dr.sc. Marko PETRIC, Geotehnički fakultet
- Linke LI, Graz University of Technology, Austria
- 

**Doktorandi zaposleni na projektu:**

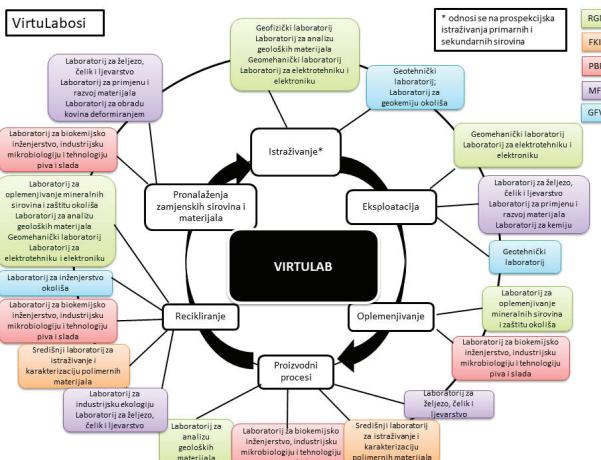
- Nikola Kaniški, mag.ing.amb., Geotehnički fakultet



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

# PROJEKT VIRTULAB - INTEGRIRANI LABORATORIJ ZA PRIMARNE I SEKUNDARNE SIROVINE

Projektom će se ulagati u opremanje laboratorija na pet fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Rudarsko-geološko-naftni fakultet - RGN, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije - FKIT, Metalurški fakultet - MF, Prehrambeno-biotehnološki fakultet - PBF i Geotehnički fakultet - GFV), s ciljem jačanja njihovih znanstveno-istraživačkih kapaciteta i uspostave virtualnog istraživačkog centra za primarne i sekundarne sirovine koji će omogućiti višu kvalitetu izvođenja nastave, ojačat će znanstveno-istraživački rad na fakultetima, omogućiti će im ravnopravno sudjelovanje u KIC inicijativi, a istovremeno će stvoriti prostor za komercijalizaciju rezultata znanstvenih istraživanja i praktičnu primjenu inovacija u gospodarstvu. Projektni partneri nastaviti će rad s korisnicima usluga u gospodarstvu, a istovremeno će nastojati proširiti postojeću suradnju.



Grafički prikaz VIRTULAB-a nakon integracije pet fakulteta – VirtuLabosi

KIC za mineralne sirovine (eng. raw materials) jest dugoročno integrirano partnerstvo više od 100 europskih organizacija iz znanstvenog i gospodarskog sektora koje s ciljem implementacije rezultata klasičnih R&D projekata prema tržištu. „Raw materials“, odnosno mineralne sirovine su ne-energetske sirovine: metali, nemetali, kamen, drvo, biomasa i sekundarne sirovine (eng. reused).

Sveučilište u Zagrebu se priključilo konzorciju koji čine Austrija, Belgija, Danska, Estonija, Finska, Francuska, Grčka, Irska, Italija, Mađarska, Nizozemska, Njemačka, Poljska, Portugal, Rumunjska, Slovačka, Slovenija, Španjolska, Švedska i Velika Britanija. Glavni koordinator za područje istočne i jugoistočne Europe je Sveučilište u Leobenu (Montan Universität Leoben), a koordinator za Sveučilište Zagrebu je Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

**Koordinator projekta na Geotehničkom fakultetu: izv. prof. dr. sc. Igor PETROVIĆ**

**Suradnici na projektu s Geotehničkom fakultetu:**

- Izv.prof.dr.sc. Nikola SAKAČ
- Doc.dr.sc. Ivana GRČIĆ
- Dr.sc. Vitomir PREMUR

**Trajanje projekta: 18 mjeseci**

**Ukupna vrijednost projekta: 14.186.222,23 kuna**

**Ukupni prihvatljivi troškovi: 12.300.603,45 kuna**

**Iznos financiranja za Geotehnički fakultet: 1.035.042,83 kuna**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

## UPUTE AUTORIMA

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

Časopis objavljuje rade 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 prilozima 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 pojmove. 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](mailto: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 teksta se dijeli u nekoliko poglavlja čiji naslovi su pisani podebljano veličine 11pt i poravnani uljevo. 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 rada 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 prikidan 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 prihvatanja rada za objavu autori imaju obavezu uskladiti rad s uputama reczenzenta/uredništva. Ako autori ne prihvate primjedbe reczenzenta/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 journal „Inženjerstvo okoliša“ (eng. Environmental Engineering) 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: [caspis@gfv.hr](mailto:caspis@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 11 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.