

ISSN 1849-4714
e-ISSN



INŽENJERSTVO OKOLIŠA

Scientific and professional journal in the area
of environmental engineering

Geotehnički
fakultet



Faculty of
Geotechnical
Engineering

BROJ/NUMBER 1

GODINA/YEAR 1

SRPANJ/JULY 2014



IMPRESSUM

Izdavač/Publisher:

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

Adresa uredništva/Editorial address:

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

Glavni urednik/Editor in Chief:

Prof. dr. sc. Vladimir Patrčević

Urednički odbor/Editorial board:

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

Tehnički urednici/Technical board:

Doc. dr. sc. Hrvoje Meaški
Davor Stanko, magistar fizike
Bojan Đurin, dipl. ing.

Tisak/Printed by:

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

Naklada/Edition:

300 primjeraka/300 copies

**Časopis izlazi dva puta godišnje. Svi radovi objavljeni u časopisu imaju međunarodnu recenziju.
Journal is published biannually. All papers published in journal have been reviewed.**

ISSN 1849-4714

Naslovna stranica/Journal cover:

Jezero Kozjak, Nacionalni park Plitvička jezera/Lake Kozjak, Plitvice Lakes National Parka (Hrvoje Meaški, 2006)

Poštovano čitateljstvo,

raduje me da vam mogu predstaviti prvi broj znanstveno-stručnog časopisa naziva *Inženjerstvo okoliša*, izdavača Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Ovaj časopis nastavlja tradiciju časopisa *Croatian geotechnical journal* koji je izlazio u razdoblju 1994. – 2002. godine.

Časopis se pokreće s namjerom daljnje afirmacije interdisciplinarnog područja inženjerstva okoliša koje uključuje područja tehničke zaštite okoliša, geoinženjerstva, upravljanja vodnim resursima te posebno one njegove segmente koji su usmjereni na identifikaciju, projektiranje, gradnju i upravljanje pojedinim sustavima za rješavanje problema zaštite okoliša. Ovi problemi odnose se naročito na onečišćenje tla, vode i zraka, zatim probleme gospodarenja otpadom te uspostavu mehanizama zaštite okoliša.

Nadamo se da će časopis biti prepoznat kao medij relevantne znanstveno-stručne komunikacije istraživača, sveučilišnih nastavnika, studenata, diplomiranih inženjera i drugih koji se u svom djelovanju i istraživanju bave problematikom zaštite okoliša i inženjerstvom okoliša u cjelini.

Časopis se izdaje u tiskanom obliku i elektroničkom obliku na internet adresi Geotehničkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu (www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html).

Jedan od glavnih ciljeva Uredništva je da se časopis u dogledno vrijeme indeksira u nekim važnim svjetskim bibliografskim bazama poput Scopus-a, GEO Abstracts-a, Inspec-a, Fluidex-a, itd.

Svjesni smo da je put do međunarodne prepoznatljivosti časopisa izuzetno zahtjevan pa će se stoga Uredništvo u ostvarivanju ovog cilja zalagati za visoku znanstvenu i stručnu razinu objavljenih radova, redovitost izlaska te primjerenu tehničku opremljenost časopisa. Nadamo se da će pokretanje našeg časopisa još više približiti hrvatskoj akademskoj i stručnoj sredini u svijetu relevantno i afirmirano znanstveno područje inženjerstva okoliša te da će s druge strane dugoročno otvoriti priliku autorima iz Republike Hrvatske da rezultate svojih istraživanja prezentiraju znanstvenicima i stručnjacima iz inozemstva koji se bave sličnom problematikom.

Kvalitetu radova koje objavljujemo u prvom broju časopisa nastojali smo osigurati slanjem primljenih radova na dvije recenzije istaknutim znanstvenicima u Republici Hrvatskoj i inozemstvu (SAD), čiji je djelokrug istraživanja vezan za zaštitu okoliša ili inženjerstvo okoliša u širem kontekstu.

U ovom prvom broju možete pročitati i upoznati se s rezultatima istraživanja djelatnika Geotehničkog fakulteta, njihovih suradnika i diplomiranih studenata koji su dio širih istraživanja koristili za izradu svojih diplomskih radova. Odabrali smo pet recenziranih radova za koje se iskreno nadam da u velikoj mjeri potvrđuju interdisciplinarnost tematike inženjerstva okoliša. To su tri izvorna znanstvena rada, jedno prethodno priopćenje i jedan stručni rad.

Svim autorima najsrdačnije zahvaljujem na njihovim radovima i priložima u ovom prvom broju. Uvjeren da će se suradnja nastaviti te da će časopis *Inženjerstvo okoliša* postići visoku kvalitetu kojoj obostrano težimo.

Posebno još jednom zahvaljujem našim cijenjenim recenzentima na njihovom trudu uloženom pri recenziji radova, čime su nam izuzetno pomogli da naš časopis već na početku bude primjereno kvalitetan i poticajan za sve buduće autore i suradnike koje očekujemo i koje pozivamo na suradnju.

Unaprijed zahvaljujemo i svim potencijalnim autorima koji će naš časopis prepoznati kao mjesto predstavljanja svojih rezultata istraživanja ili iskustava i spoznaja iz širokog područja inženjerstva okoliša kojim se zajedno bavimo.

Ispred Uredništva časopisa, kao glavni i odgovorni urednik, pozivam sve zainteresirane autore da nam dostave svoje radove, kako bismo mogli odabrati one koji svojom kvalitetom i tematikom mogu doprinijeti afirmaciji časopisa, a čitateljima, osim znanja, ponuditi i subjektivno zadovoljstvo čitanja kao i prikaz novih spoznaja.

Na kraju pozivam i sve koji se na istraživačkoj ili stručnoj razini bave inženjerstvom okoliša, a posebno zaštitom okoliša ili održivim razvojem da u nadolazećem razdoblju podrže časopis te da svojim primjedbama, prijedlozima i kritikama pomognu da časopis bude kvalitetniji i relevantniji. Pri tome ću kao glavni urednik nastojati da se ostvari otvorena i učinkovita komunikacija između čitatelja i uredništva sa svrhom unaprjeđenja kvalitete časopisa.

Srdačan pozdrav.

Glavni urednik:

Prof.dr.sc. Vladimir Patrčević

SADRŽAJ - CONTENTS

Vladimir Patrčević, Ana Kopjar, Bojan Đurin

ANALIZA INFILTRACIJE OBORINA NA ALUVIJALNOM TLU
ANALYSIS OF RAINFALL INFILTRATION ON THE ALLUVIAL SOIL..... 7

Anita Ptiček Siročić, Marko Omazić, Zlata Hrnjak-Murgić

UTJECAJ BIOADITIVA NA SVOJSTVA AMBALAŽNOG MATERIJALA
BIOADDITIVE INFLUENCE ON THE PROPERTIES OF PACKAGING MATERIALS 19

Dinko Vujević, Aleksandra Mikić, Sandra Lenček, Dragana Dogančić, Saša Zavrtnik,
Vitomir Premur, Aleksandra Anić Vučinić

INTEGRALNI PRISTUP RJEŠAVANJU PROBLEMATIKE INDUSTRIJSKIH OTPADNIH VODA
AN INTEGRATED APPROACH TO THE INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT..... 25

Dinko Vujević, Maja Čalopek, Marija Novosel, Aleksandra Anić Vučinić

SASTAV ODLAGALIŠNOG PLINA NA ODLAGALIŠTU OTPADA PRUDINEC/JAKUŠEVEC
COMPOSITION OF LANDFILL GAS ON PRUDINEC/JAKUŠEVEC LANDFILL..... 33

Stjepan Strelec, Mario Gazdek, Boris Jeđud

PROCJENA KRUTOSTI TLA IN-SITU ISPITIVANJIMA I KORELACIJE IZMEĐU v_s , N_{SPT} I N_{10H}
SOIL STIFFNESS EVALUATION BASED ON IN-SITU TESTS AND
CORRELATIONS BETWEEN v_s , N_{SPT} AND N_{10H} 43

www.gumiimpex.hr
info@gumiimpex.hr

T: 042 684 434
F: 042 684 444

Tehnologijom ZA okoliš i čovjeka!

Gumi **IMPEX**
- GRP

RECIKLIRANJEM



stare gume
postaju

NOVI

korisni proizvodi!!!

• gumene obloge

- uz bazene
- za dječja igrališta
- za terase i dvorišta



HIDROING

d.d. VARAŽDIN
• GRADITELJSTVO I HIDROGRADNJA •

Optujska 161, 42000 Varaždin

HIDROGRADNJA, NISKOGRADNJA, VISOKOGRADNJA

tel. +385(0)42 332-600; fax. +385(0)42 330-365

e-mail: info@hidroing.hr; www.hidroing.hr

61 GODINA U GRADITELJSTVU

ANALIZA INFILTRACIJE OBORINA NA ALUVIJALNOM TLU

ANALYSIS OF RAINFALL INFILTRATION ON THE ALLUVIAL SOIL

Vladimir Patrčević¹, Ana Kopjar², Bojan Đurin³

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, vlapatr@gfv.hr,
² Hrvatske vode, Vodnogospodarska ispostava za mali sliv "Trnava", I. Mažuranića 2, Čakovec, HRVATSKA,
ana34kopjar@gmail.com

³ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, bojan@gfv.hr

Sažetak: Ovim se radom želi dati doprinos dosadašnjim spoznajama na području poznavanja vertikalnih procesa u hidrološkom ciklusu. To se odnosi na vodopropusne prostore riječnog aluvija, koji nisu u neposrednoj vezi sa površinskim vodnim režimom vodotoka. Cjelovito upoznavanje tih hidroloških procesa i prirodnih zakona gibanja vode u vertikalnoj izmjeni moguće je jedino istraživačkim radom. Direktnim mjerenjem i hidrološkom analizom čimbenika vertikalne vodne bilance podzemnih voda na infiltracijskoj stanici „Varkom“ u Varaždinu od 1988. godine, moguće je bliže upoznati procese infiltracije i evapotranspiracije, a koji su karakteristični za klimatske osobine sjeverozapadnog prostora Republike Hrvatske.

Cljučne riječi: oborine, infiltracija, vertikalna vodna bilanca, eksperimentalna stanica, hidrološki sustav.

Abstract: This paper aims to contribute to current state of the art in the field of knowledge of vertical processes in the hydrological cycle. These are broad and well permeable areas of river alluvium, which are not directly related to surface water regime of the watercourse. Most fully exploring these hydrological processes and natural laws of motion of water may be the only exploratory work. By direct measurement from year 1988. and by analysis of hydrological factors of the vertical water balance of groundwater at the infiltration station "Varkom" it is possible to get to know processes of the infiltration and evapotranspiration, which are characteristic of the climate region of the northwestern area of Croatia.

Keywords: precipitation, infiltration, vertical water balance, experimental station, hydrological system.

Received: 07.01.2014 / Accepted: 09.05.2014

Znanstveni rad

1. UVOD I DOSADAŠNJE SPOZNAJE

Infiltracija je hidrološki proces vertikalnog gibanja vode kroz prozračnu zonu zemljišta, od površine zemljišta prema slobodnom nivou podzemne vode, uslijed djelovanja kapilarnih sila i sile gravitacije. Proces se odvija kroz pore zemljišta koje su ispunjene vodom i zrakom i direktno utječe na promjenu vlažnosti u prozračnoj zoni. Voda koja učestvuje u tom procesu pripada gravitacijskoj vodi. Ukoliko uslijed infiltracije dođe do podizanja slobodnog nivoa podzemne vode, odnosno do promjene granice između zasićene i prozračne zone zemljišta, taj dio procesa infiltracije se naziva efektivna infiltracija ili perkolacija.

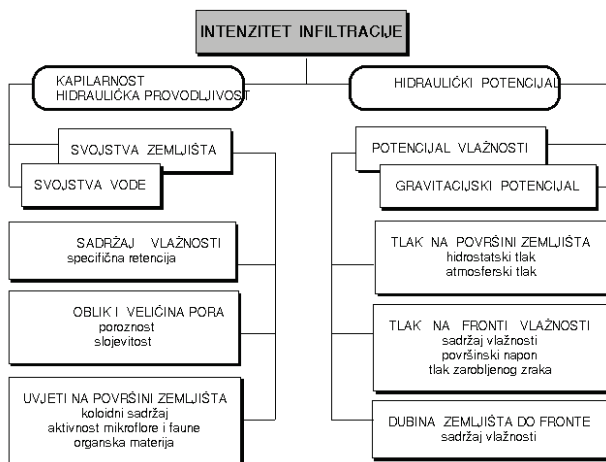
Proces infiltracije počinje u trenutku prispjeća oborine iz atmosfere na površinu zemljišta. U tom trenutku na površini zemljišta se stvara saturirani sloj ispod kojega se nalazi prozračna zona sa nižim potencijalom vlažnosti. Kroz pore većih dimenzija, voda se vertikalno giba nadalje prvenstveno pod djelovanjem sile gravitacije odnosno gravitacijskog potencijala kao gravitacijska voda. Pore manjih dimenzija, u prvom trenutku preuzimaju vodu iz gornjeg zasićenog sloja u obliku kapilarne vode, zbog djelovanja molekularnih sila odnosno kapilarnog potencijala. U ovom procesu očito je da oba potencijala djeluju u istom smjeru čime se hidraulički potencijal pojačava.

Intenzitet infiltracije f je zbog toga najveći na početku procesa, odnosno u trenutku prispjeća oborine na površinu nezasićenog zemljišta. Proces infiltracije će se vremenom smanjivati na račun povećavanja vlažnosti prozračne zone i trajati će tako dugo dokle je razlika u potencijalu vlažnosti zasićenog i nezasićenog dijela zemljišta veća od njegove specifične retencije. Međutim ukoliko je oborina na površinu zemljišta dugotrajna i intenzivna, količina vlažnosti zemljišta iznad prodiruće fronte vlažnosti je stalno iznad vrijednosti specifične retencije, čime je prisutno stalno gravitacijsko gibanje vode u toj zoni. Vremenski povećanjem dubine prodiranja vode, fronta vlažnosti nailazi na dijelove prozračne zone zemljišta sa sve većim sadržajem vlažnosti čime se smanjuje djelovanje kapilarnog potencijala, a time i intenziteta procesa infiltracije.

Intenzitet infiltracije u stvari predstavlja količinu vode koja iz atmosfere ulazi u zemljište u jedinici vremena, u zavisnosti od složenih uvjeta koji su u tom trenutku prisutni. Ti uvjeti posebno uključuju količinu i raspodjelu vlažnosti u prozračnoj zoni zemljišta, hidrauličku provodljivost te zone, te količinu i intenzitet oborine pridošle na površinu zemljišta. Ukoliko je intenzitet oborine veći od intenziteta infiltracije, dolazi do retencije vode na površini i saturacije tog dijela zemljišta. Tada je količina infil-

trirane vode maksimalna za prisutne uvjete zemljišta i nosi naziv infiltracijski kapacitet.

Na veličinu intenziteta infiltracije, kao vrlo složenog hidrološkog procesa utječu mnogobrojni čimbenici, od kojih se oni vezani uz osobine zemljišta mogu prema Gray i Norumu (1968) shematski prikazati slikom 1.



Slika 1. Čimbenici utjecaja na proces infiltracije

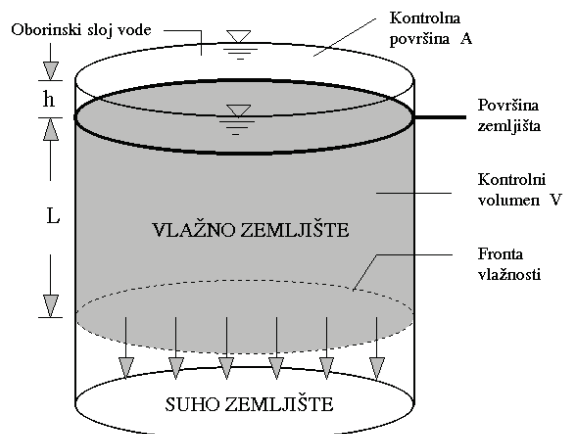
Obzirom da je stupanj zasićenja zemljišta vlagom glavni čimbenik koji bitno utječe kako na kapilarnost i hidrauličku provodljivost tako i na hidraulički potencijal, to je potrebno poznavati vertikalnu raspodjelu vlažnosti u stupcu kontrolnog volumena zemljišta.

Raspodjela vlažnosti u profilu zemljišta prozračne zone može se prema Bodmanu i Culmanu (1944) podijeliti na četiri glavne zone:

- zasićenu zonu uz samu površinu zemljišta
- zonu prijenosa vlažnosti sa nezasićenim i približno jednolikim sadržajem vlažnosti
- zonu vlaženja u kojoj se vlažnost smanjuje sa dubinom
- frontu vlažnosti, odnosno liniju na kojoj se vrši izmjena vlažnosti između vlažnijeg zemljišta iznad i suhog zemljišta ispod fronte.

Postoje dva osnovna pristupa kod proučavanja i analize hidrološkog procesa infiltracije. To je teorijsko istraživanje sa ciljem iznalaženja analitičkog rješenja parcijalnih diferencijalnih jednačbi kretanja vode kroz nezasićenu poroznu sredinu i primijenjeno istraživanje u cilju dobivanja empirijskih relacija, odnosno modela na mjernim postajama u prirodnim uvjetima.

Infiltracijska teorija je pri tome razvijana od mnogih istraživača kao što su Horton (1933), Philip (1957), Green i Ampt (1911), Huggins i Monke (1966), Holtan (1961), Crawford i Linsley (1966), Huber (1981), kao i mnogi drugi. Zajedničko u njihovim pristupima je da svi modeli usvajaju postojanje tankog zasićenog površinskog sloja zemljišta h od kojeg započinje proces infiltracije.



Slika 2. Shema Darcy fluksa po dubini L

Jedan od najranijih modela koji opisuje takav proces razvio je Horton uz uvjete konstantnog intenziteta oborine, većeg od infiltracijski kapaciteta zemljišta. Pri tome je ustanovio da infiltracija počinje sa nekim infiltracijskim kapacitetom f_0 i dalje se eksponencijalnim zakonom umanjuje na jednu stalnu vrijednost intenziteta infiltracije f_c koji odgovara infiltraciji slobodne gravitacijske vode kroz pore zemljišta, kada je vlažnost zemljišta dostigla stupanj specifične retencije, a prema jednačbi (1)

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (1)$$

Hortonov model infiltracije u stvari predstavlja rješavanje veličine difuzije vlažnosti $D(\theta)$ od saturirane površine zemljišta prema nezasićenoj zoni. Na to su ukazali Eagleson (1970) i Raudkivi (1979) ističući da se Hortonova jednačba može izvesti iz Richardove jednačbe, Phoon *et al.* (2007):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \pm K_n \right) \quad (2)$$

ako se uzme da su veličine K_n i D konstantne vrijednosti, nezavisne od stupnja zasićenja zemljišta vlagom. Tada se jednačba (2) može prikazati u standardnom obliku difuzne jednačbe (3) čije rješenje daje oblik raspodjele vlažnosti zemljišta u zavisnosti o dubini z i vremenu t .

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (3)$$

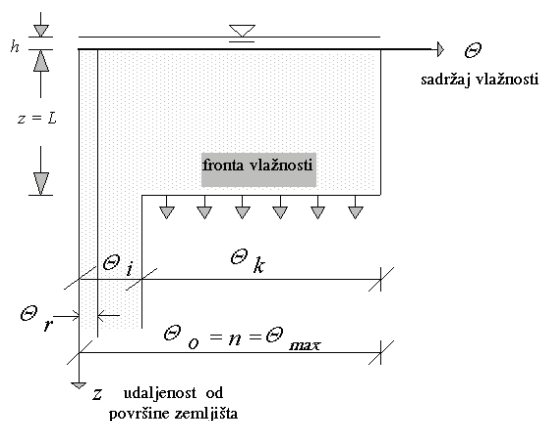
Model koji je predložio Horton, prikazan u Fleming (1975) i Chow *et al.* (1988) predstavlja rješenje difuzne jednačbe za jednodimenzionalnu, vertikalnu infiltraciju u prozračnoj zoni zemljišta kao jednolike i neograničene sredine sa konstantnim početnim sadržajem vlažnosti.

Pri tome su veličine hidrauličke provodljivosti K_n i koeficijenta kapilarne difuzije D usvojene kao promjenljive u funkciji vlažnosti zemljišta θ :

$$f(t) = \frac{1}{2} \varphi t^{-0.5} + K_n \quad (4)$$

gdje je ϕ parametar zemljišnog upijanja vlažnosti odnosno adsorpcija.

Infiltracija vode kroz prozračnu zonu aluvijalnog, dobro propusnog zemljišta očituje se postojanjem izrazite fronte vlažnosti kod koje je prijelaz od zatečene vlažnosti θ_i do stanja zasićenja θ_0 vrlo nagli i oštri. Takva fronta kroz nezasićeno, porozno zemljište, odlikuje se izrazito strmim profilom vlažnosti. Ta konstatacija opravdava pretpostavku, da se cijeli profil vlažnosti od površine zemljišta do fronte vlažnosti L zamijeni pravokutnim oblikom konstantne vlažnosti θ_k , koja je bliska poroznosti zemljišta n , u slučaju prodiranja fronte u suho zemljište, a kako je prikazano slikom 3, Chow et al. (1988).



Slika 3. Varijable u Green-Ampt modelu infiltracije

Takvu pojednostavljenu sliku infiltracije postavili su Green i Ampt (1911) uz pretpostavku da je visina vode h na površini zemljišta zanemarivo mala. Analiziranje modela moguće je preko vertikalnog stupca kontrolnog volumena zemljišta prikazanog slikom 2. Uz pretpostavku početnog sadržaja vlažnosti θ_i konstantnog po vertikali cijelog kontrolnog volumena, prodiranje fronte vlažnosti zemljišta će se naglo povećavati do maksimalne vrijednosti θ_0 , koja odgovara veličini poroznosti prozračne zone zemljišta n . Povećanje količine vode u kontrolnom volumenu u iznosu $L(n-\theta_i)$ kroz jediničnu kontrolnu površinu, rezultat je ukupne infiltracije $F(t)$.

$$f(t) = K_n \left[1 + \frac{\theta_k H_k}{F(t)} \right] \quad (5)$$

gdje su:

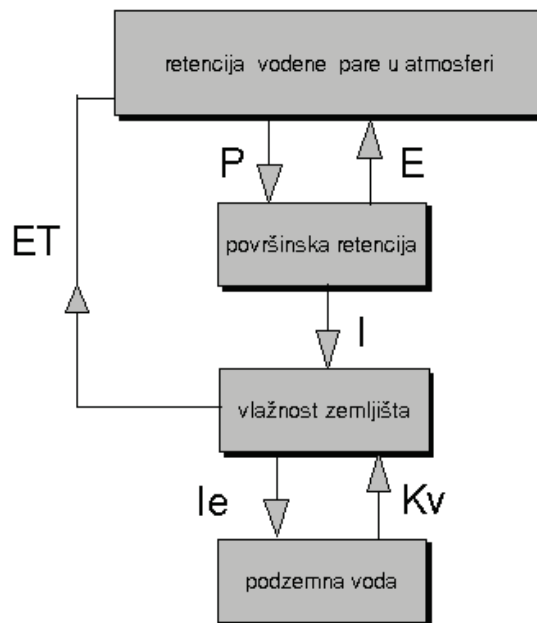
H_k – kapilarni potencijal

θ_k – konstantna vlažnost zemljišta bliska poroznosti zemljišta.

U ovom radu opisuje se pristup primijenjenog istraživanja u cilju dobivanja empirijske relacije infiltracije sa glavnim čimbenicima, odnosno definiranje modela infil-

tracije u prirodnim uvjetima na mjernoj stanici Varkom u Varaždinu, Hrvatske vode (1994).

Neposrednim mjerenjem glavnih ulaznih i izlaznih parametara vertikalne vodne bilance podzemnih voda i hidrološkom analizom vodne bilance, mogu se upoznati osnovne osobine hidrološkog sustava u vertikalnoj vodnoj bilanci (slika 1), odnosno glavni hidrološki procesi koji u prirodi određuju vertikalnu izmjenu vode između atmosfere i podzemne vode.



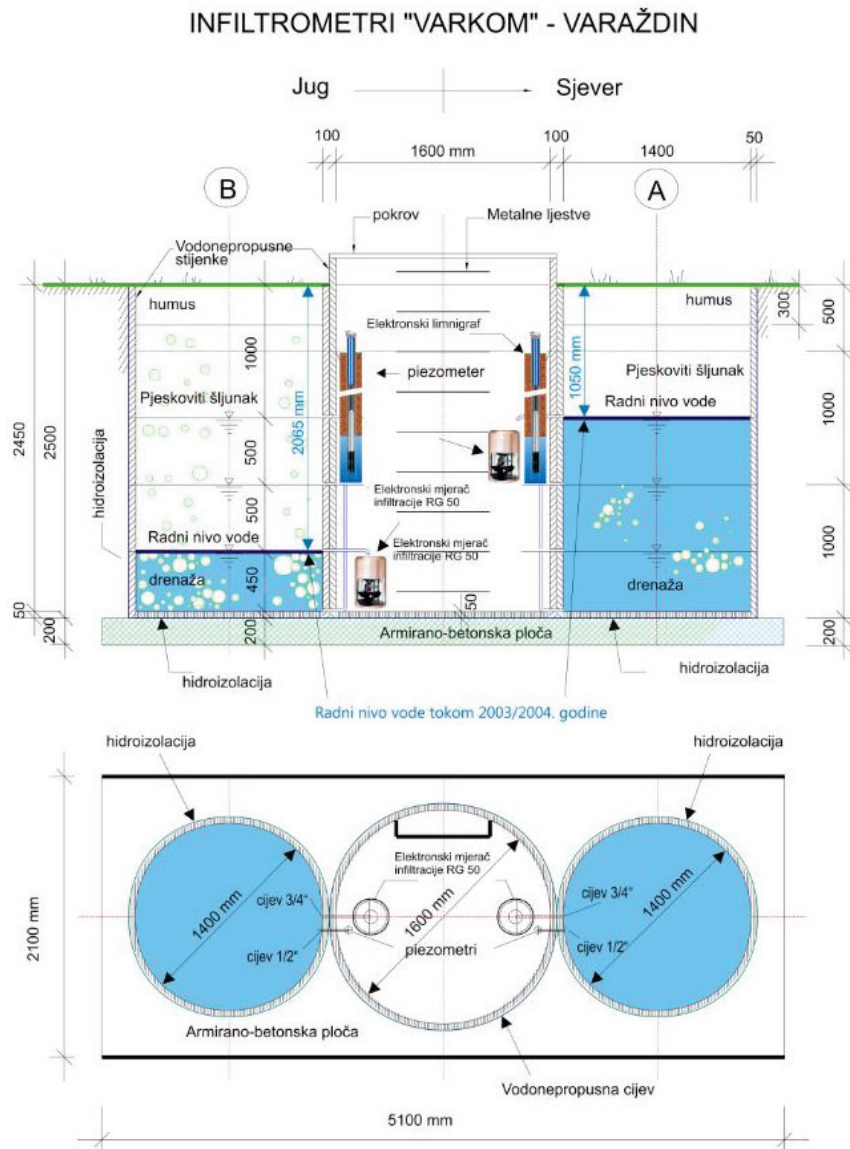
Slika 4. Shema vertikalne vodne bilance

Za takvo upoznavanje hidroloških procesa kao dijelova hidrološkog ciklusa na području sjeverozapadne Hrvatske koristi se infiltrometerska stanica „Varkom“ (slika 5), kao jedan zatvoreni hidrološki sustav u obliku bunara-infiltrometra koji su 1988. godine postavljeni u krugu vodocrpilišta „Varkom“ u širem aluviju rijeke Drave kod Varaždina. Infiltrometerska stanica osnovana je kao eksperimentalna u okviru Studije podzemnih voda za određivanje zaliha i zaštite voda dravske doline na prostoru Vinica-Varaždin-Zamlaka-Varaždin Breg.

Mjerna stanica je započela sa radom 18. listopada 1988. godine. Postavljena je unutar zaštitne zone vodocrpilišta, zapadno od prilazne ceste do kontrolnog centra vodocrpilišta. Stanica se sastoji od mjernih bunara - infiltrometara kao zatvorenog hidrološkog sustava u kojima je uspostavljen kontrolni volumen nezasićene (prozračne zone) okolnog zemljišta riječnog aluvija i zasićene zone sa kontroliranim nivoom podzemne vode.

2. OPIS HIDROLOŠKOG SUSTAVA

Hidrološki sustav infiltrometara predstavljen je infiltrometrima u obliku dva bunara izrađena od vodonepropusnog materijala, temeljena na armirano-betonskoj ploči na dubini 250 cm od površine zemljišta. Infiltrometar A i infiltrometar B profila Φ 1400 mm služe kao mjerni bunari, Hrvatske vode (1994).



Slika 5. Hidrološki sustav „Varkom“ Varaždin

Na dijelu aluvijalnih nanosa prostora vodocrpilišta "Varkom" nalaze se uglavnom pjeskoviti šljunci homogenog sastava sa istim hidrogeološkim osobinama sloja aluvijalnog zemljišta koje se nalazi i u bunarima infiltrometrima.

Geološki sastav zemljišta sadržan u prozirnoj zoni infiltrometara na površini sadrži sloj humusa sa prirodnom livadnom travom.

Dakle isti se geološki sastav zemljišta sadrži u prozirnoj zoni infiltrometara sa međuzratom volumenskom poroznosti od $n = 25\%$. Hidraulička provodljivost K određena je sa vrijednosti od 9.0 cm/s što odgovara strukturi okolnog zemljišta do dubine od 16.0 m .

Koeficijent efektivne poroznosti zemljišta u sustavu infiltrometra određen je sa veličinom $\eta = 0.18$

Dakle, analiza procesa infiltracije u prirodnim uvjetima na mjernoj stanici Varkom u Varaždinu obavlja se uspostavljanjem dva zatvorena hidrološka sustava u kojima se odvija proces vertikalne izmjene vode (slika 7) između atmosfere i podzemne vode na određenoj dubini.

Srednji bunar $\Phi 1600 \text{ mm}$ je radni bunar i služi kao kontrolno mjesto u kojem se nalaze mjerni uređaji za mjerenje izlaznih parametara vertikalne vodne bilance.

U zoni mikrolokacije infiltrometara je postavljena i automatska meteorološka stanica (slika 6). Stanica je opremljena kišomjerom za kontinuirano mjerenje oborina (elektronski ombrograf).

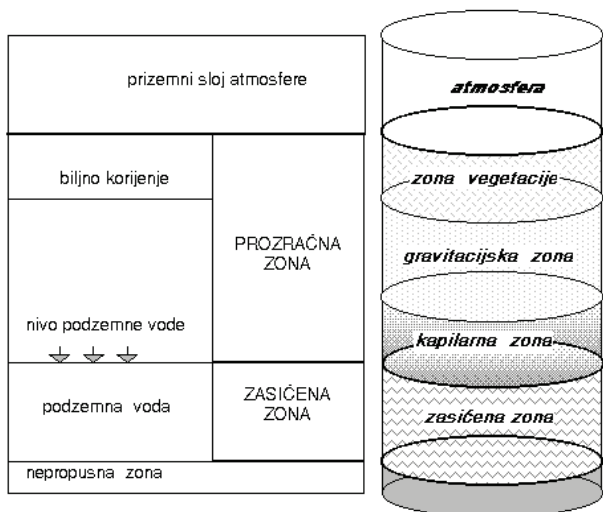
Svi ostali podaci mjerenja: infiltracija (elektronski mjeraci efektivne infiltracije), temperatura zraka (elektronski termometar), evaporacija (elektronski isparitelj klase A) prikupljaju se na centralni uređaj (logger) u 60 minutnim vremenskim intervalima.

Mjerno mjesto je opremljeno elektronskim mjeracima efektivne infiltracije i elektronskim limnigrafima za mjerenje promjene nivoa vode zasićene zone bunara.

Pristup mjeracima omogućen je radnim bunarom, pomoću silaznih ljestava za pristup motritelja. Ugrađena je manja automatska, potopljena crpka za izbacivanje prikupljene vode od efektivne infiltracije sustava infiltrometara (slika 8).



Slika 6. Meteorološka stanica na Infiltrometru „Varkom“ Varaždin



Slika 7. Zone infiltracije u hidrološkom sustavu



Slika 8. Radni bunar na infiltrometru Varaždin

3. PROGRAM ISTRAŽNIH RADOVA

Na infiltrometarskoj stanici „Varkom“ od 1988. godine obavljaju se svakodnevna kontinuirana mjerenja najvažnijih procesnih čimbenika vertikalne vodne bilance.

Kao **ulazni parametri** u jednadžbu vertikalne vodne bilance provode se kontinuirana mjerenja:

- Mjerenje oborine
- Mjerenje temperature zraka
- Mjerenja isparivanja (isparitelj klase-A)

Kao **izlazni parametri** u vertikalnoj vodno-bilancnoj jednadžbi provode se kontinuirana mjerenja:

- Mjerenje efektivne infiltracije
- Mjerenje promjene nivoa podzemne vode u bunarima - infiltrimetrima

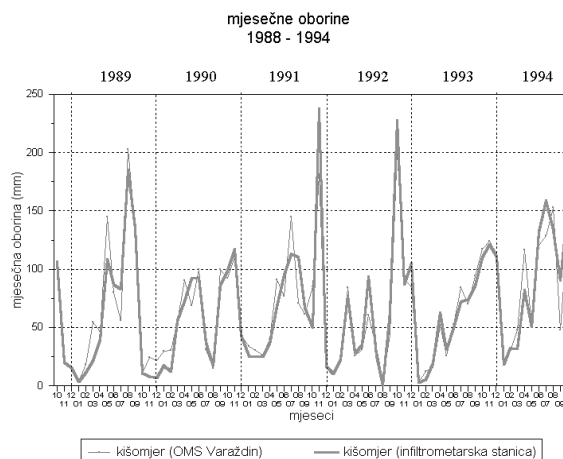
Prikupljaju se i odgovarajući klimatološki podaci na meteorološkoj stanici OMS Varaždin na kojoj postoje i mjerenja isparivanja sa isparitelja klase-A. Meteorološka stanica OMS Varaždin udaljena je cca 3000 m od infiltrometrijske stanice „Varkom“. Obrada i analiza izmjerenih i prikupljenih podataka obavlja se godišnje za tekuću hidrološku godinu. U ovom radu prikazuju se ukupni rezultati istraživanja za početno razdoblje od šest hidroloških godina (1988/89 – 1993/94).

4. ANALIZA ULAZNIH PARAMETARA

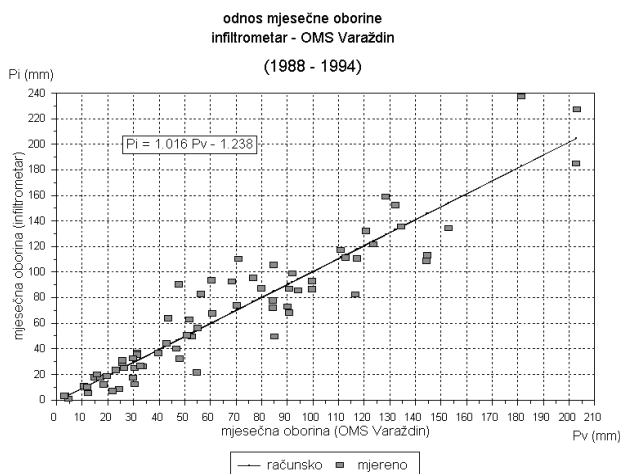
U ulazne parametre hidrološkog sustava spadaju klimatološki čimbenici kao što su oborine, temperatura zraka, isparivanje, te ostali značajni klimatološki parametri. Oborina, isparivanje i temperatura zraka kontinuirano se mjere na meteorološkoj stanici u okviru infiltrometarske stanice „Varkom“.

4.1. Oborine

Mjera za količinu pale oborine predstavljena je visinom stupca vode u kišomjeru. Visina napadanog snijega mjeri se pomoću snjegomjerne letve na tri točke neposredno uz kišomjer i infiltrometre. U razdoblju od 1988. – 1994. godine izmjerene oborine na infiltrometarskoj stanici uspoređene su sa oborinama izmjerenim na meteorološkoj stanici OMS Varaždin. (slika 9)



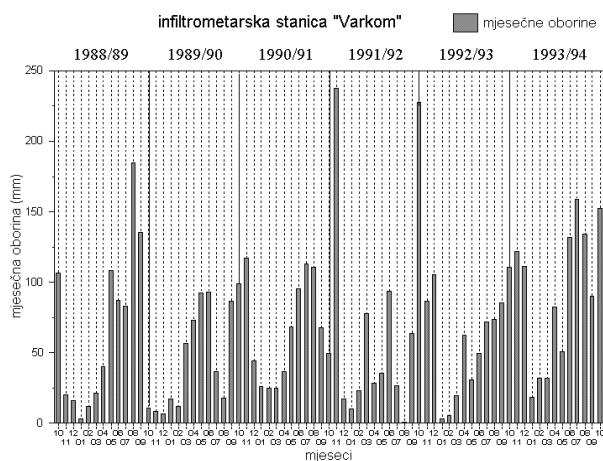
Slika 9. Odnos mjerene oborine



Slika 10. Korelativna zavisnost mjesečnih oborina stanice „Varkom“ i meteorološke OMS stanice VŽ

Koeficijent korelacije odnosa izmjerenih mjesečnih oborina iznosi $r = 0.89$. Usporedni odnos tih vrijednosti prikazan je na slici 9. dok je proračun odnosa linearne korelacije prikazan na slici 10.

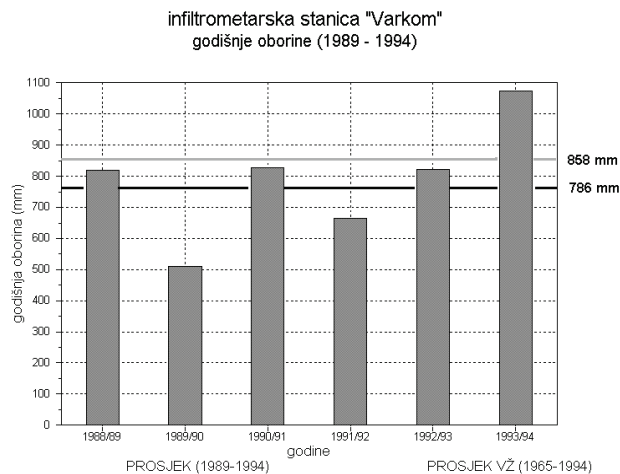
Analiza ukazuje na vrlo slične mikroklimatske osobine prostora infiltrmetarske stanice Varkom, sa širim prostorom sjevero-zapadnog dijela Republike Hrvatske koji pokriva meteorološka stanice OMS Varaždin. Oborine kao ulaz u zatvoreni hidrološki sustav infiltrmetara izmjerene na infiltrmetarskoj stanici „Varkom“ u razdoblju od šest hidroloških godina (1988/89 – 1993/94) pokazane su na slici 11.



Slika 11. Raspored mjesečnih oborina na meteorološkoj stanici infiltrmetra Varkom

Prikazane vrijednosti predstavljaju osnovni ulaz u hidrološki sustav za analizu vertikalne vode bilance Dravskog aluvija na širem prostoru između rijeka Plitvice i Drave.

Godišnje vrijednosti izmjerenih oborina na kišomjeru infiltrmetarske stanice „Varkom“ sa srednjom vrijednosti iz šestogodišnjeg niza mjerenja od $P = 786$ mm prikazane su slikom 12. Taj je prosjek znatno niži od 30 godišnjeg prosjeka (1965–1994) za meteorološku stanicu OMS Varaždin, koji iznosi $P = 858$ mm.



Slika 12. Godišnje vrijednosti izmjerenih oborina

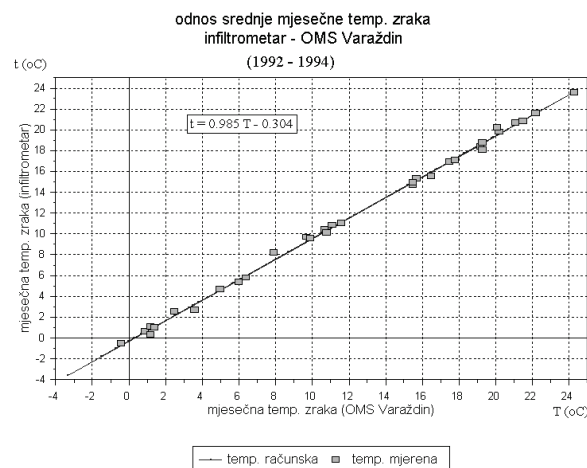
Ti podaci ukazuju da su u ovoj fazi provedenih šest godišnjih istražnih radova isti obavljani u ciklusu nešto sušnijeg hidrološkog razdoblja, Pandžić *et al.* (2009).

4.2. Temperatura zraka

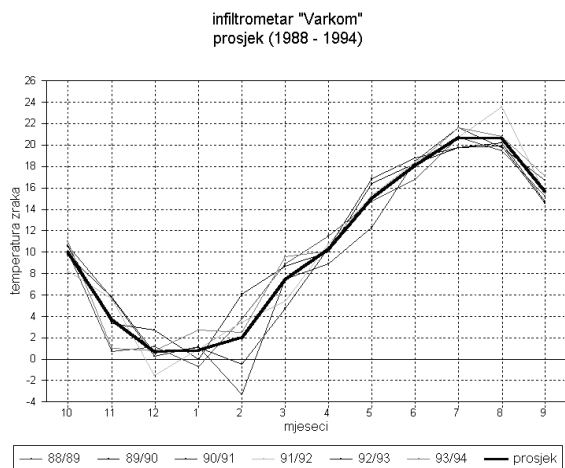
Izmjerene mjesečne temperature zraka na infiltrmetarskoj stanici i njihov korelacijski odnos sa mjerenjima na meteorološkoj stanici OMS Varaždin prikazan je slikom 13. Koeficijent korelacije odnosa srednje mjesečne temperature zraka mjerenih na te dvije mjerne stanice iznosi visokih $r = 0.99$.

Takva čvrsta korelacijska veza ukazuje da se većina meteoroloških parametara izmjerenih na OMS Varaždin može prihvatljivo primjenjivati za širi prostor lokacije infiltrmetarske stanice Varkom.

Mjesečni hod temperatura zraka izmjerenih na meteorološkoj stanici infiltrmetra Varkom za razdoblje od šest hidroloških godina (1988/89 – 1993/94) prikazan je na slici 14.



Slika 13. Izmjerena mjesečna temperatura zraka



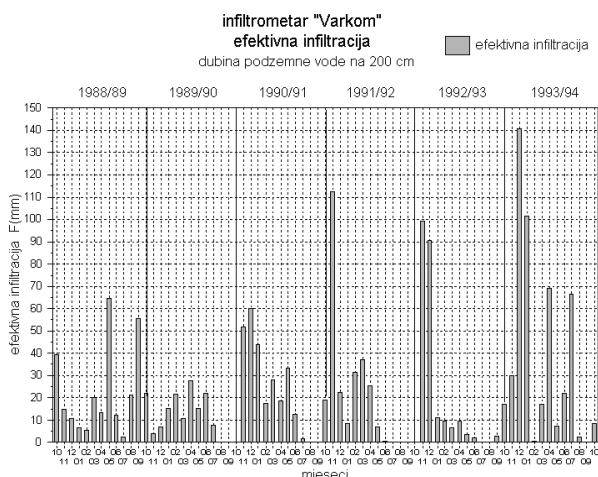
Slika 14. Mjesečni hod temperature zraka

5. ANALIZA IZLAZNIH PARAMETARA

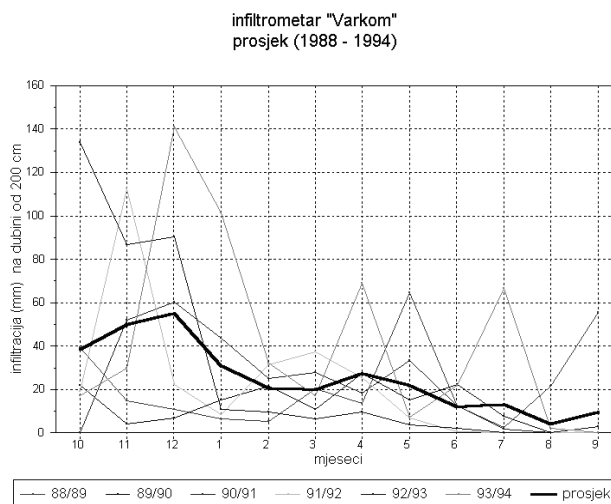
U izlazne parametre hidrološkog sustava koje se mje-
re na mjernoj infiltrometrijskoj stanici „Varkom“ spada
efektivna infiltracija kod različitih dubina nivoa podzeme-
ne vode. To se odnosi na zasićenu zonu u hidrološkom
sustavu-infiltrometru, odnosno u slučaju sniženja nivoa
podzemne vode uslijed isparivanja putem kapilarnog
izdizanja vode, u kapilarnoj zoni sustava. Efektivna infil-
tracija pripada hidrološkim procesnim čimbenicima u
određivanju vertikalne vodne bilance. Ukupno ispariva-
nje, odnosno stvarna ili aktualna evapotranspiracija je
vezana uz efektivnu infiltraciju. Ona predstavlja izlazni,
odnosno procesni čimbenik koji pripada klimatološkim
parametrima u određivanju vertikalne vodne bilance.

5.1. Efektivna infiltracija

Efektivna infiltracija se mjeri na infiltrometru A i in-
filtrometru B. U toku istražnih radova (1988/89 –
1993/94) mjerena je efektivna infiltracija do dubine pod-
zemne vode od 200 cm. Rezultati mjerenja efektivne
infiltracije na 200 cm dubine podzemne vode prikazani su
na slici 15, a mjesečni hod efektivne infiltracije u razdobl-
ju šest godina istražnih radova prikazan je na slici 16.



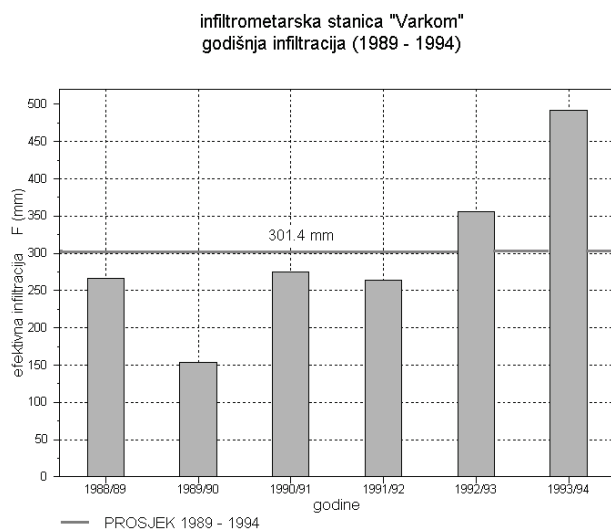
Slika 15. Efektivna infiltracija na 200 cm dubine pod-
zemne vode



Slika 16. Mjesečni hod efektivne infiltracije

Proces infiltracije dobro prati proces pojave oborina,
ali samo tokom hladnijeg dijela godine. U toplijem raz-
doblju godine kada su visoke temperature zraka i unatoč
većih oborina, efektivna infiltracija se smanjuje, te goto-
vo prestaje tokom mjeseca srpnja i kolovoza.

Rezultati godišnje vrijednosti efektivne infiltracije na
dubinu od 200 cm podzemne vode za 6-godišnje razdobl-
je u sustavu infiltrometra prikazani su na slici 17.

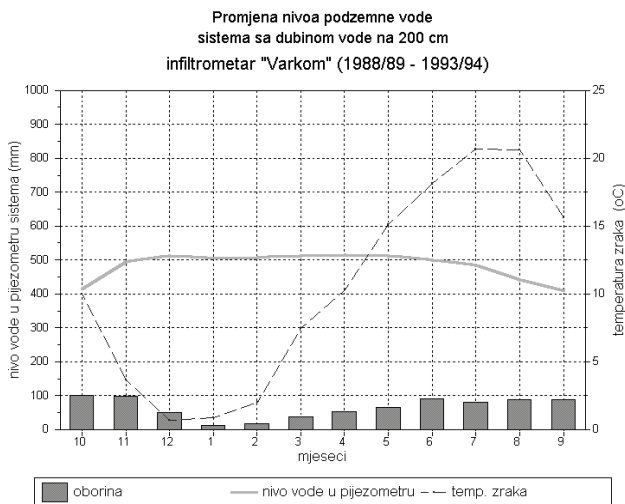


Slika 17. Godišnje vrijednosti efektivne infiltracije

5.2. Promjena nivoa podzemne vode u sustavu infiltrometara (zasićena zona)

Radna dubina podzemne vode u svakom sustavu infil-
trometra uočljiva je putem izmjere nivoa vode u pijezo-
metrima sustava. Referentna nula predstavlja dno svakog
infiltrometra, odnosno dubina 2500 mm od površine
zemljišta.

Znakovite promjene nivoa vode u sustavu u šesto-
godišnjem prosjeku, prikazane su slikom 18.



Slika 18. Promjena prosječnih nivoa podzemne vode u sustavu infiltrimetra tijekom istraživačkog razdoblja

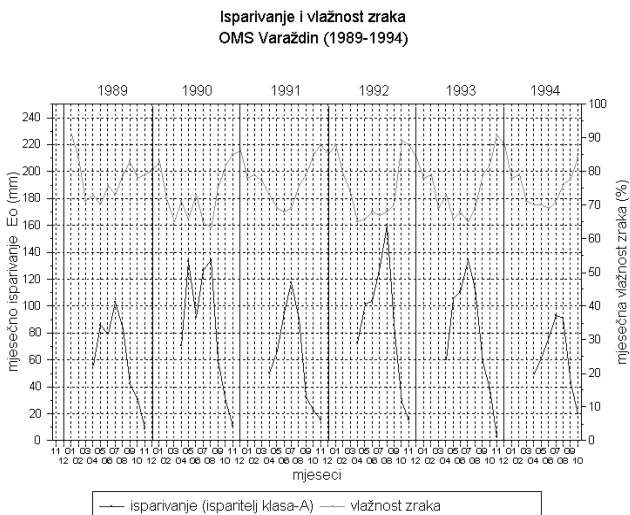
Uz kontinuirano mjerenje snižavanja nivoa vode u mjernim bunarima pomoću elektronskog limnigrafa, te usvojenog koeficijenta efektivne poroznosti zemljišta u sustavu infiltrimetra od $\eta = 0.18$, moguće je odrediti veličinu godišnjih gubitaka vode iz sustava infiltrimetra.

Ti gubici vode su direktna posljedica isparivanja iz zasićene zone infiltrimetra, odnosno podzemne vode.

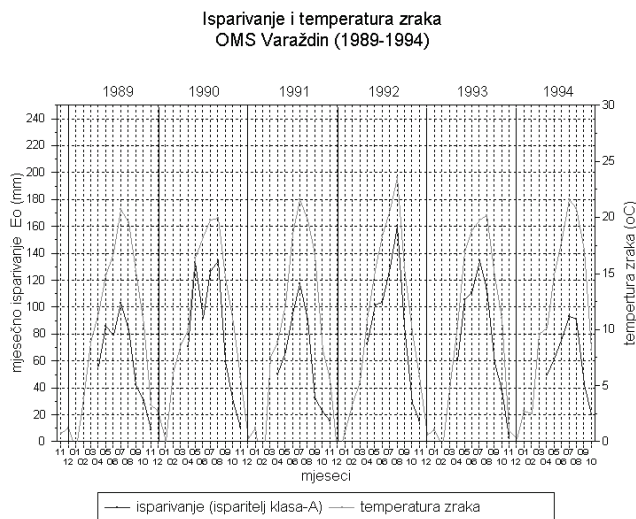
5.3. Isparivanje

Isparivanje na meteorološkoj stanici se mjeri putem isparitelja klase-A, samo u toplom djelu godine.

Rezultati mjerenja isparivanja za cjelokupno razdoblje istražnih radova prikazani su slikom 19, sa izmjerenim vrijednostima vlažnosti zraka, odnosno na slici 20 sa izmjerenim vrijednostima temperature zraka.



Slika 19. Odnos isparivanja i vlažnosti zraka

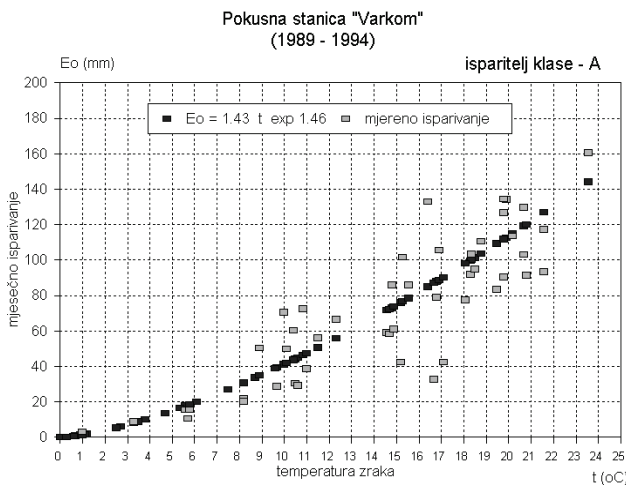


Slika 20. Odnos isparivanja i temperature zraka

Korelacijska veza evaporacije isparitelja klase-A sa srednjom mjesečnom temperaturom zraka t ($^{\circ}\text{C}$), proračunata je za šest godišnje razdoblje istražnih radova (1989 – 1994).

Korelacijska veza uspostavljena je nelinearnim korelacijskim odnosom $E_0 = f(t)$, prikazanim na slici 21 sa vrlo visokim koeficijentom korelacije ($r = 0.90$) te slijedećim parametrima funkcije:

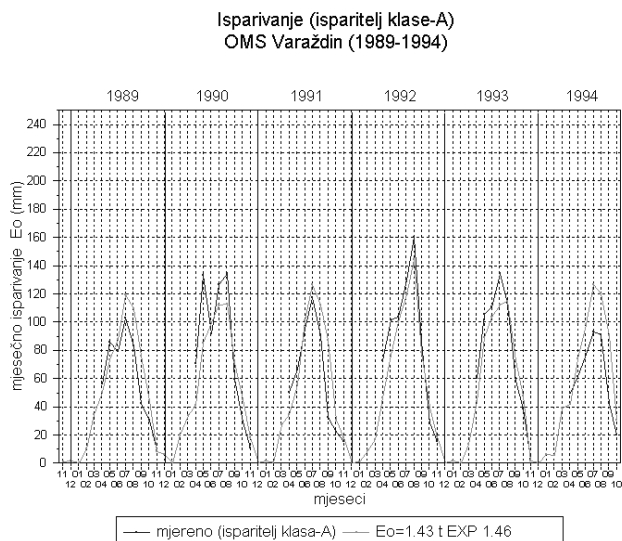
$$E_0 = 1,43 t^{1,46} \quad (6)$$



Slika 21. Isparitelj klase A

Prilagodba računskog isparavanja E_0 iz jednadžbe (6) na stvarno isparivanje izmjereno na isparitelju klase-A na meteorološkoj stanici OMS „Varaždin“, grafički je prikazana na slici 22, iz razdoblja provedenih istražnih radova na mornoj stanici „Varkom“.

Tokom hladnog dijela godine nema mjerenja isparivanja na isparitelju klase-A, pa se mogu zbog dobre korelacije koristiti proračunata isparivanja preko korelacijske funkcije (6). Takvi podaci su bili korišteni u analizi isparivanja na pokusnoj stanici „Varkom“ u razdoblju (studen – ožujak).



Slika 22. Računsko i stvarno isparavanje

6. IDENTIFIKACIJA HIDROLOŠKOG SUSTAVA

Analiza ulaznih i izlaznih parametara sustava provedena je u cilju određivanja nelinearnog racionalnog modela koji će opisivati navedena dva hidrološka procesa (stvarnu evapotranspiraciju ET_a i efektivnu infiltraciju I_e) za sustav infiltrometra sa dubinom podzemne vode na 200 cm.

U sustavu se uspostavlja stabilizirano stanje gibanja vode. Uspostavljeni sustav infiltrometra mjerne stanice „Varkom“ predstavlja zatvoreni hidrološki sustav, kao dio hidrološkog ciklusa.

Izvršena je analiza rezultata mjerenja za mjesečne vrijednosti u šest - godišnjem vremenskom razdoblju istraživanja. Opća jednadžba vertikalne vodne bilance za sustav infiltrometara se može izraziti kao:

$$P = I_e + ET_a \quad (7)$$

gdje su:

P – izmjerena mjesečna oborina, kao prirodni ulazni parametar u sustav

I_e – izmjerena mjesečna efektivna infiltracija, kod stalne dubine podzemne vode u sustavu na 200 cm

ET_a – ukupni mjesečni gubitak vode u sustavu, koji obuhvaća sva isparavanja vode iz sustava kod dubine podzemne vode na 200 cm (aktualna evapotranspiracija).

Svi prikazani podaci predstavljaju sintezu provedenih istraživanja na infiltrometarskoj stanici „Varkom“ tokom šest hidroloških godina istraživanja, te su pregledno grafički prikazani na navedenim slikama.

6.1. Definiranje modela aktualne evapotranspiracije

Prilikom bilanciranja vode u hidrologiji se koriste tri pojma gubitka vode uslijed isparavanja:

- Evaporacija E_o je gubitak vode sa vodene površine ili vodom zasićenog zemljišta.
- Potencijalna evapotranspiracija ET_p definirana je Thorntwaitovom definicijom i odgovara stanju vlažnosti zemljišta u idealnim uvjetima.
- Aktualna evapotranspiracija ET_a je stvarni gubitak vode iz zemljišta u prirodnim uvjetima.

Potencijalna evapotranspiracija ET_p uvažava idealne uvjete stanja vlažnosti sustava. Procjena procesa evapotranspiracije u sušnom dijelu godine sa malim oborinama nije pogodna za bilanciranje voda jer se u proračune mogu unijeti znatne pogreške.

Kako bi se mogao odvijati proces evapotranspiracije u sustavu moraju biti ispunjene dvije osnovne fizičke pretpostavke:

- Mora postojati prisutnost vlažnosti u sustavu (uvjet u funkciji oborine)
- Mora postojati prisutnost energije u sustavu (uvjet u funkciji temperature zraka)

Uvažavajući ta dva uvjeta istovremeno, moguće je odrediti model aktualne evapotranspiracije ET_a sustava, koji uvažava stvarne gubitke vode u prirodnim uvjetima. Prihvaćajući opću jednadžbu vertikalne vodne bilance (7) i sve navedene pretpostavke hidrološkog sustava, moguće je odrediti stvarne gubitke vode u vertikalnoj vodnoj bilanci koji su uzrokovani evapotranspiracijom.

U sušnim razdobljima godine kada su male oborine i visoka temperatura zraka, isparavanje je malo u apsolutnim vrijednostima, ali u postocima je veliko u odnosu na oborinu. Obrnuto je u hladnijem djelu godine sa većim količinama oborina. Isparavanje je tada u apsolutnim vrijednostima veće, ali malo u odnosu na oborinu, Hrvatske vode (1994).

Zbog toga se uvode bezdimenzionalni parametri u opću jednadžbu (7) vertikalne vodne bilance sustava kao:

- mjesečni koeficijent isparavanja e
- mjesečni koeficijent infiltracije f

odnosno:

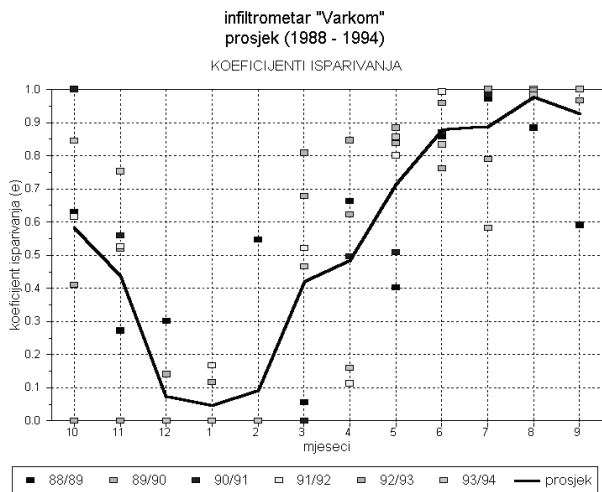
$$e = 1 - f \quad (8)$$

gdje su:

$$e = \frac{ET_a}{P} \quad (9)$$

$$f = \frac{I_e}{P} \quad (10)$$

Uvedeni koeficijent isparivanja e analizirao se je za razdoblje istražnih radova (1988 – 1994), te se njegov karakteristični raspored tokom godine može uočiti na slici 23.



Slika 23. Koeficijent isparivanja e

Dovodeći koeficijent isparivanja e u funkcijski odnos sa srednjom mjesečnom temperaturom zraka t , za cjelokupno razdoblje istražnih radova na sustavu infiltrometra sa 200 cm dubine podzemne vode, uspostavila se njihova korelacijska zavisnost oblika $e = f(t)$. Uočena je dosta čvrsta nelinearna korelacija oblika:

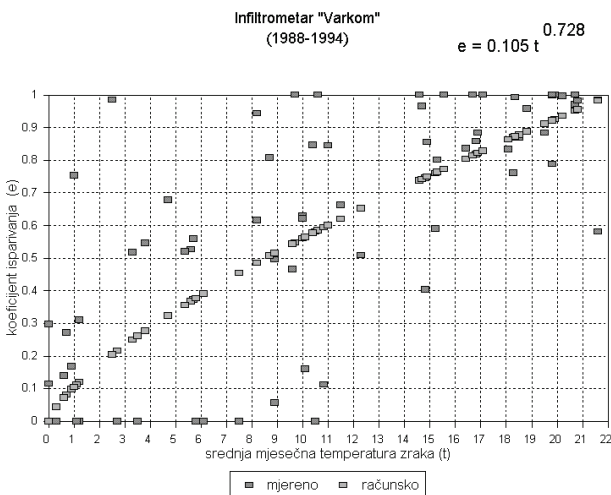
$$e = wt^n \tag{11}$$

Parametri funkcije su određeni Gaussovom metodom minimalizacije veličinama:

- $w = 0.105$
- $n = 0.728$

uz koeficijent korelacije $r = 0.71$ što ukazuje na značajnu povezanost koeficijenta isparivanja e sa temperaturom zraka t u mjesečnim relacijama.

Grafički prikaz funkcije vidljiv je na slici 24.



Slika 24. Prikaz funkcije korelacijske ovisnosti - (6)

Uvažavajući dva osnovna preduvjeta za vlažnost i energiju dobiven je model za određivanje aktualne evapotranspiracije ET_a hidrološkog sustava, na infiltrometarskoj stanici „Varkom“:

$$ET_a = P \cdot e \tag{12}$$

$$ET_a = w \cdot P \cdot t^n \tag{13}$$

Odnosno uvrštavanjem proračunatih parametara u jednadžbu (13):

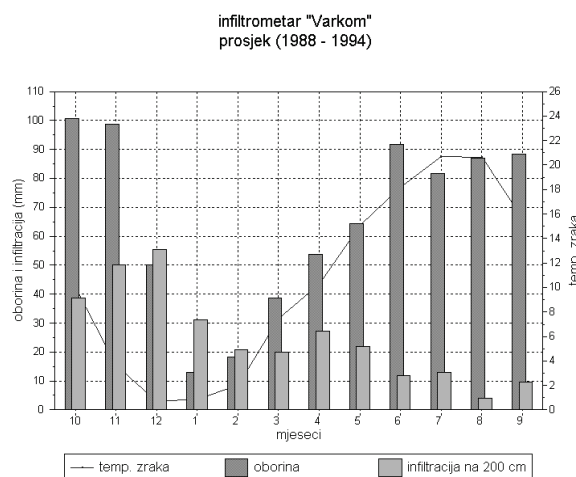
$$ET_a = 0.105 P \cdot t^{0.728} \tag{14}$$

Model je vrlo prikladan za korištenje u svakodnevnoj hidrološkoj praksi za određivanje aktualne evapotranspiracije sa prirodno travnatih tla bez agrokulturnih zahvata. Potrebno je poznavanje samo podataka o količini mjesečnih oborina P i srednjih mjesečnih temperatura zraka t , na prostoru za koji se želi odrediti veličina aktualne mjesečne evapotranspiracije u cilju bilanciranja voda.

6.2. Definiranje modela efektivne infiltracije

Efektivna infiltracija je izlazni parametar u vodnoj bilanci infiltrometra. Prihranjivanjem sustava infiltrometara gravitacijskom vodom od oborine P , rezultira mjernom efektivnom infiltracijom I_e u sustavu.

Rezultati analize mjerenih vrijednosti (oborina, temperatura, infiltracija) na sustavu infiltrometra „Varkom“, sa dubinom podzemne vode 200 cm, iz razdoblja istražnih radova (1988/89–1993/94) prikazani su grafički na slici 25.



Slika 25. Izmjerene vrijednosti na sustavu infiltrometra „Varkom“

Proces efektivne infiltracije I_e utječe na promjenu granice između zasićene i prozračne zone sustava, odnosno uzrokuje povišenje nivoa podzemne vode u sustavu, te predstavlja prihranjivanje zasićene zone oborinskom vodom iz atmosfere.

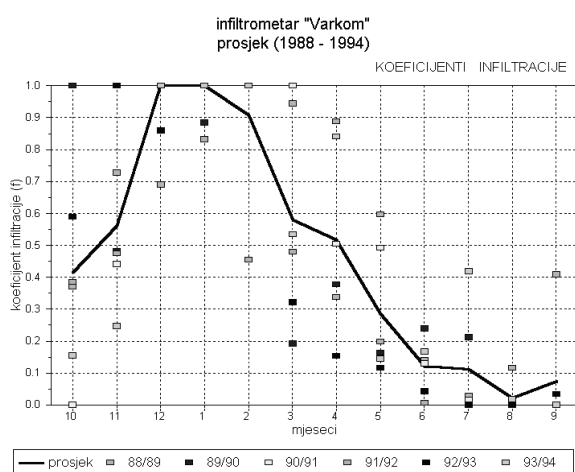
U hidrološkom sustavu infiltrometara na mjernoj stanici "Varkom" kod odabranog radnog nivoa podzemne

vode, nema mogućnosti prirodnog povišenja toga nivoa. Prihranjivanje sistema infiltrometara gravitacijskom vodom od oborine P , rezultira izmjerenom efektivnom infiltracijom I_e u sustavu. Uz uvažavanje svih pretpostavki koje su postavljene prilikom analize vodne bilance sustava infiltrometara, te prihvaćanjem valjanosti opće jednadžbe vertikalne vodne bilance (7) za sustav, kao i izvedene jednadžbe vertikalne bilance (8), moguće je definirati koeficijente infiltracije f za cijelo razdoblje istražnih radova od šest hidroloških godina.

Prilikom proračuna koeficijenta infiltracije, osim direktno izmjerene efektivne infiltracije na mjeracu infiltrometra, uzeta je u proračun i indirektno količina efektivne infiltracije na bazi mjerenog podizanja nivoa vode u pijezometru sustava, nakon ljetnog razdoblja godine (listopad-prosinac). Takva infiltracija nije izmjerena u posudi mjeraca stanice, jer je uzrokovala prirodno podizanje nivoa podzemne vode do radnog nivoa u sustavu infiltrometra.

Rezultati proračuna koeficijenta infiltracije za cjelokupno razdoblje istražnih radova pokusne stanice „Varkom“ prikazan je u grafičkom obliku slikom 26.

Očita pravilnost rasporeda koeficijenta infiltracije tokom godine ukazuje na mogućnost određivanja modela efektivne infiltracije sustava putem modificirane jednadžbe vertikalne vodne bilance (8).



Slika 26. Koeficijent infiltracije f

Konačni model određivanja ukupne mjesečne efektivne infiltracije hidrološkog sustava vertikalne vodne bilance aluvija rijeke Drave ima slijedeći oblik, MZT (1996):

$$f = 1 - e \quad (15)$$

$$f = 1 - wt^n \quad (16)$$

odnosno nakon supstitucije sa oborinom P dobije se model efektivne infiltracije u obliku:

$$I_e = P(1 - wt^n) \quad (17)$$

odnosno, za ukupne mjesečne vrijednosti efektivne infiltracije na aluvijalnom tlu sjevero-zapadne Hrvatske izrazom:

$$I_e = P(1 - 0,105 t^{0,728}) \quad (18)$$

Ovakav dobiveni model infiltracije vezan je uz opću jednadžbu vertikalne vodne bilance (7).

7. ZAKLJUČAK

Za potrebe proračunavanja režima podzemnih voda važno mjesto uzimaju vertikalni procesi u hidrološkom ciklusu, kao dominantni. Glavni čimbenici koji utječu na režim podzemnih voda su:

- Klimatološki
- Hidrološki
- Hidrogeološki
- Biološki.

Ulazni parametri u sustav, koji se kontinuirano mjere na mjernoj stanici „Varkom“ su osnovni klimatološki parametri, zastupljeni oborinama i temperaturom zraka. Osnovni klimatološki parametri izmjereni na pokusnoj stanici „Varkom“ vrlo su slični izmjerenim parametrima na meteorološkoj stanici OMS Varaždin.

Koeficijent korelacije iznosi za oborine $r = 0.89$, dok je za temperaturu zraka $r = 0.99$. Izlazni parametri sustava predstavljeni su rezultatima mjerenja promjene nivoa u pijezometrima sistema, efektivne infiltracije i gubitka vode iz sustava uslijed isparivanja. Šestogodišnjim istražnim radovima na hidrološkom sustavu „Varkom“ analizirani su isparivanje (evapotranspiracija) i infiltracija kao glavni elementi vertikalne vodne bilance. Analiza sustava je provedena u cilju određivanja nelinearnog regresijskog modela, koji zadovoljavajuće opisuje oba hidrološka procesa, za sustav infiltrometra sa dubinom podzemne vode na 200 cm i to:

- Stvarna evapotranspiracija ET_a (mm)
- Efektivna infiltracija I_e (mm)

Analizom i sintezom rezultata mjerenja dobiven je matematički model VARKOM za određivanje efektivne infiltracije I_e hidrološkog sustava na mjernoj stanici „Varkom“.

Uvođenjem koeficijenta isparivanja i koeficijenta infiltracije u opću jednadžbu vertikalne vodne bilance, dobio se konačni model koji definira ukupnu mjesečnu efektivnu infiltraciju, hidrološkog sustava, kao dio vertikalne vodne bilance riječnog aluvija između rijeke Plitvice i Drave.

Model se može koristiti za prostore koji odgovaraju sličnom hidrogeološkom i biološkom stanju sustava na aluviju rijeke Drave u sjeverozapadnoj Hrvatskoj.

8. LITERATURA

Bodman G B, Colman E. A. (1944) Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils. *Soil Sci Soc Am J* 8:116 -122.

Chow V T, Maidment D R, Mays L W (1988) *Applied hydrology*. McGraw-Hill, New York.

Fleming G (1975) *Computer simulation techniques in hydrology*. Elsevier, New York.

Hrvatske vode (1994) *Hidrološki istražni radovi na eksperimentalnoj stanici, infiltrometru – Varaždin u razdoblju od 1988. do 1994. godine – izvješća*.

McCuen R H (1989) *Hydrologic analysis and design*. Prentice-Hall, New Jersey.

Ministarstvo znanosti i tehnologije Republike Hrvatske (MZT) (1996) *Znanstveni projekt (2-11-006) „Vertikalna bilanca podzemnih voda riječnog aluvija“ (1991. – 1996.)*.

Pandžić K, Trninić D, Likso T, Bošnjak, T (2009) Long-term variations in water balance components for Croatia. *Theor and Appl Clim* 95: 39-51.

Phoon K, Tan T, Chong, P (2007) Numerical simulation of Richards equation in partially saturated porous media: under-relaxation and mass balance. *Geot and Geol Eng* 25:525-541.

UTJECAJ BIOADITIVA NA SVOJSTVA AMBALAŽNOG MATERIJALA

BIOADDITIVE INFLUENCE ON THE PROPERTIES OF PACKAGING MATERIALS

Anita Ptiček Siročić¹, Marko Omazić, Zlata Hrnjak-Murgić²

¹ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska, anitaps@gfv.hr

² Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Marulićev trg 19, 10000 Zagreb, Hrvatska, zhrnjak@fkit.hr
omazic.89@gmail.com

Sažetak: U ovom su radu ispitivani uzorci ambalažnih polietilenskih (PE-LD) filmova kojima su dodani različiti prirodni konzervansi (cimet, zeleni čaj, ružmarin i đumbir). PE-LD filmovi dobiveni su prešanjem na hidrauličnoj preši Dake pri 120 °C. Toplinska stabilnost uzoraka praćena je termogravimetrijskom analizom (TGA) u struji dušika (protok 100 ml/min) kod brzine zagrijavanja od 10 °C/min u temperaturnom intervalu od 25 do 600 °C. Uzorcima su određena mehanička svojstva (prekidna čvrstoća i prekidno istezanje) te je ispitana njihova postojanost na djelovanje mikroorganizama. Rezultati mehaničkih svojstava pokazuju smanjenje prekidnog istezanja u odnosu na čisti polietilen, ali i povećanje vrijednosti prekidne čvrstoće kod nekih uzoraka. Iz rezultata je vidljivo da dodatak bioaditiva polietilenskim filmovima povećava njihovu toplinsku postojanost, a da najveću antimikrobnu aktivnost pokazuje uzorak polietilenskog filma pripremljenog s cimetom.

Ključne riječi: ambalažni materijali, polietilen, bioaditivi, toplinska svojstva, antimikrobna aktivnost

Abstract: In this work polyethylene (PE-LD) films containing various natural preservatives (cinnamon, green tea, rosemary and ginger) were studied. Polyethylene films, which is used as packaging material, were prepared by hydraulic Dake press at 120 °C. Thermal stability of the samples was monitored by thermogravimetric analysis (TGA) in nitrogen flow rate of 100 ml/min at heating rate of 10 °C/min in temperature range from 25 to 600 °C. Mechanical properties of samples were also determined (tensile strength and elongation at break) and their resistance to the action of microorganisms was tested. Results of mechanical properties show the decrease of the values of elongation at break and slight increase of tensile strength in comparison to pure polyethylene. The results show that the addition of bioadditives in polyethylene films increases their thermal stability and the highest antimicrobial activity shows sample prepared with cinnamon.

Keywords: packaging materials, polyethylene, bioadditives, thermal properties, antimicrobial activity

Received: 10.01.2014 / Accepted: 03.04.2014

Znanstveni rad

1. UVOD

Polimerni materijali tehnički su upotrebljive tvari građene od visokomolekulskih organskih spojeva kojima je specifična velika molekulska masa. Njihova složena struktura i morfologija daje im specifična svojstva i područja primjene radi čega se ubrajaju među najvažnije tehničke materijale današnjice i imaju široko područje primjene u gotovo svim područjima ljudske djelatnosti. Polimerni ambalažni materijali, kao i ostale vrste ambalažnog materijala imaju funkciju zaštite proizvoda.

Era polimernih ambalažnih materijala započinje početkom 20-og stoljeća otkrićem različitih plastičnih masa. Polistiren (PS), poli (vinil-klorid) (PVC), poli(tetrafluoretilen) (PTFE), polietilen visoke gustoće (PE-HD), polietilen niske gustoće (PE-LD), silikoni, polipropilen (PP), polikarbonat (PC) i mnogi drugi materijali koji su obilježili prošlo stoljeće, zbog svojih svojstava kao što su fleksibilnost, čvrstoća i mala masa, postali su nezamjenjivi kao ambalažni materijali.

Polietilen niske gustoće najčešće je korišten polimerni materijal za pakiranje hrane zbog svojih prednosti odnosno čvrst je, lagan, elastičan, otporan na vodu i većinu kemikalija (Goodman 1986). Plastična ambalaža je izdržljiva, neslomljiva, lagana i higijenska te se za njenu proi-

zvodnju i transport troši puno manje energije u usporedbi s drugim ambalažnim materijalima.

Glavni cilj ambalaže je spriječiti kontaminaciju robe, odnosno spriječiti prijevremeni razvoj mikroorganizama i na taj način produžiti trajnost robe (Stipanelov Vrandečić 2012; Hrnjak-Murgić 2010). Nadalje, ambalaža štiti robu od raznih mehaničkih naprezanja, fizičkih, kemijskih i atmosferskih utjecaja kao i od djelovanja mikroorganizama i insekata. Svojstva ambalaže, odnosno polimernog materijala od kojeg je ona izrađena, mogu se modificirati dodatkom različitih aditiva. Stalnim istraživanjima polimernih materijala svojstva im se uvelike poboljšavaju čime se povećava spektar njihove primjene.

Prednost polimernih materijala je da se mogu koristiti kao sekundarna sirovina odnosno moguće ih je reciklirati, a takav način višekratnog korištenja polimera jedan je od načina smanjenja negativnog utjecaja na okoliš (Pravilnik o ambalaži i ambalažnom otpadu 2013). Mehanička i toplinska svojstva polimera od iznimnog su značaja u mnogobojnim primjenama kao i svojstvo permeabilnosti koje podrazumijeva propusnost na zrak, vodenu paru i CO₂.

Nadalje, sve se više nastoji izbjeđavati upotreba umjetnih konzervansa, a umjesto njih se koriste prirodne antimikrobne tvari koje će, prevedene u prikladan oblik i

primjenom odgovarajućih tehnoloških rješenja, pokazivati jednaku učinkovitost. Tako određene tvari, poput začina i biljaka, pokazuju antimikrobno djelovanje, a istovremeno imaju svrhu aromatiziranja hrane prilikom pakiranja (Tajkarima *et al.* 2010; Rhim *et al.* 2013). Posebno su učinkovite u zaštiti površine hrane u pakiranju tj. sprečavaju prodor mikroorganizama i njeno kvarenje osobito pri pakiranju voća i povrća. Cilj ovog rada bio je ispitati kako poboljšati zaštitnu funkciju ambalaže odnosno istražiti utjecaj različitih prirodnih konzervansa na toplinska i mehanička svojstva polietilenskih folija kao i njihovu antimikrobnu otpornost.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Materijali

U radu je korišten polietilen niske gustoće (PE-LD), Okiten 245A, Dioki, Hrvatska (gustoća $\rho = 0,924 \text{ g/cm}^3$, maseni protok taljevine, MFR=2,3 g/10 min). Bioaditivi koji su dodani u polietilenski film su cimet, zeleni čaj, đumbir i ružmarin.

2.2. Priprava uzoraka

Uzorci polietilenskih filmova dobiveni su iz granula prešanjem na hidrauličnoj preši Dake Model 44-226 između dviju teflonskih folija pri čemu je temperatura čeljusti preše bila 120 °C. Uzorak je izložen predgrijavanju od 1 minute, a zatim je provedeno prešanje u trajanju od 2 minute. Na pojedini isprešani uzorak čistog polietilenskog filma jednakomjerno je po cijeloj površini raspršen aditiv (cimet, ružmarin, zeleni čaj, đumbir) te je uzorak ponovo stavljen na prešu na ~10 sekundi da bi dodatak zadržao na filmu.

2.3. Metode karakterizacije

Termogravimetrijska analiza

Toplinska razgradnja ispitivanih polietilenskih filmova provedena ispitana je na termogravimetru TG Q500, TA Instruments, u temperaturnom intervalu od 25 do 600 °C pri brzini zagrijavanja od 10 °C/min u inertoj struji dušika.

Mehanička svojstva

Pripremljenim ispitnim epruvetama polietilenskih filmova (90 mm x 10 mm x 0,15 mm) određena su mehanička svojstva (prekidna čvrstoća i istezanje) na kidalici Zwick Testing Machine (model 1445), brzinom kidanja od 50 mm/min pri konstantnoj temperaturi od 23 °C i 65 %-tnoj vlažnosti zraka.

Ispitivanje postojanosti na djelovanje mikroorganizama

Mješovita kultura mikroorganizama potječe iz aktivnog mulja anaerobnog postrojenja ANAMET za obradu otpadnih voda - Pliva, Savski Marof i iz prethodno gnojenog poljoprivrednog tla otoka Lastovo. Iz smjese otopi-

ne aktivnog mulja (100 mL) i 50 g tla, nakon miješanja i filtriranja, priređena je suspenzija mješovite kulture mikroorganizama. Suspenzija mješovite kulture je spremljena u hladnjak na +4 °C do upotrebe.

Sterilnom tehnikom rada 1 mL suspenzije mješovite kulture prenesen je u označene sterilne Petrijeve zdjelice. Prethodno je otopljen hranjivi agar, zagrijavanjem do vrenja sve dok se podloga potpuno ne otopi te je čuvan u vodenoj kupelji pri 45 °C. Otopljena podloga izlivena je u Petrijeve zdjelice na 1 mL suspenzije mješovite kulture te je sadržaj homogeniziran kružnim pokretanjem u obliku broja 8. Nakon što je podloga očvrstnula, na podlogu su nanoseni diskovi različitih uzoraka promjera 1 cm i Petrijeve zdjelice su postavljene u obrnutom položaju u termostatu na inkubaciju pri 37 °C tijekom 48 h.

3. REZULTATI I RASPRAVA

3.1. Termogravimetrijska analiza

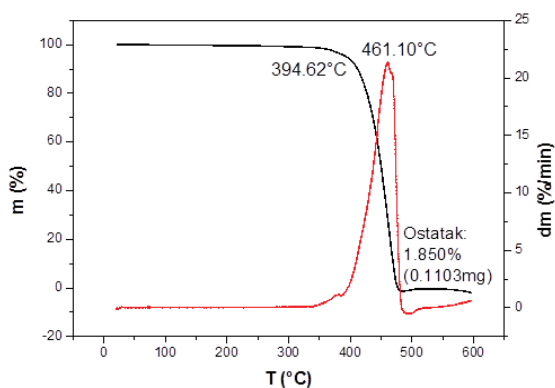
Termogravimetrijska analiza (TGA) najčešće je korištena metoda za procjenu toplinske postojanosti polimernih materijala u inertoj (N₂) i/ili u oksidativnoj (O₂) atmosferi, a omogućuje dobivanje važnih informacija o mehanizmu razgradnje polimernih materijala koji su izloženi stvarnim atmosferskim uvjetima. Utjecaj topline može znatno promijeniti svojstva polimera.

Usljed njegovog izlaganja visokim temperaturama dolazi do razlaganja i nastajanja različitih niskomolekulskih produkata, ovisno o njegovom sastavu i mehanizmu razgradnje. Razgradnja/dekompozicija je endoterman proces u kojem je potrebno dovesti više energije nego što je energija veze između pojedinih atoma te tako osigurati dovoljnu aktivacijsku energiju. Da bi započeo proces razgradnje, polimer prvo mora apsorbirati toplinu dovoljnu za kidanje primarnih veza, a kada je taj uvjet zadovoljen dolazi do razlaganja.

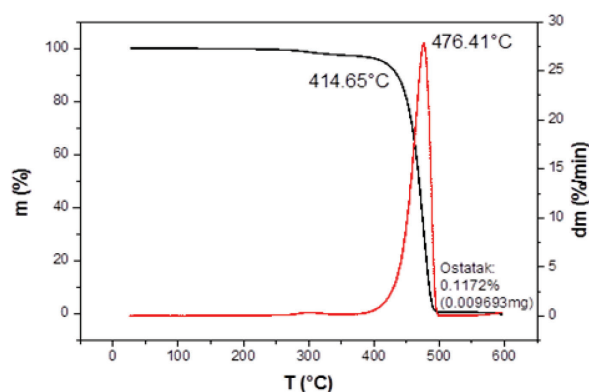
Termogravimetrijska analiza pripremljenih uzoraka provedena je u temperaturnom području od 25-600 °C pri brzini zagrijavanja od 10 °Cmin⁻¹ u struji dušika. Rezultati mjerenja za ispitivane uzorke prikazani su na slikama 1-5 kao TG krivulje (gubitak mase uzorka s promjenom temperature) i DTG krivulje (brzina gubitka mase u ovisnosti o temperaturi). Toplinska razgradnja čistog polietilena (slika 1) odvijala se u jednom stupnju u temperaturnom području od 350-490 °C kao što je i poznato iz literature (Peterson *et al.* 2001; Grassie & Scoott 1985).

Iz TG i DTG krivulja vidljivo je da se ispitivani uzorci pripremljeni s različitim aditivima također razgrađuju u jednom stupnju kao i čisti polietilen. Nadalje, povećanje toplinske stabilnosti određenih uzoraka potvrđuje i temperatura T₉₅ odnosno temperatura kod koje se razgradilo 5 % uzorka. Tako za uzorke pripremljene s cimetom i đumbirom T₉₅ iznosi 425 °C odnosno 414 °C što je znatno viša temperatura u odnosu na čisti polimer. Kod preostalih uzoraka T₉₅ temperatura razgradnje niža je u odnosu na polietilen što znači da su toplinski nepostojaniji.

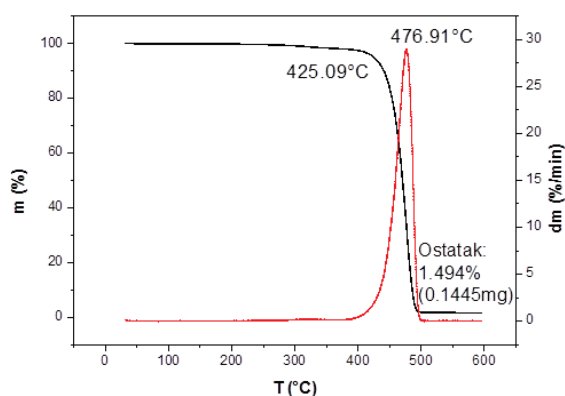
Temperatura kod maksimalne brzine razgradnje (T_{max}) uzorka pripremljenog s cimetom (slika 2) pomaknuta je k višoj temperaturi (T_{max}=477 °C) u odnosu na čisti polietilen (T_{max}=461 °C) što ukazuje da je ispitivani uzorak toplinski stabilniji u odnosu na čisti polietilen.



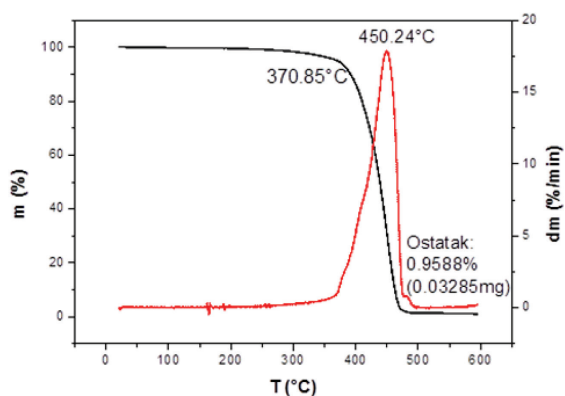
Slika 1. TG i DTG krivulje čistog polietilena



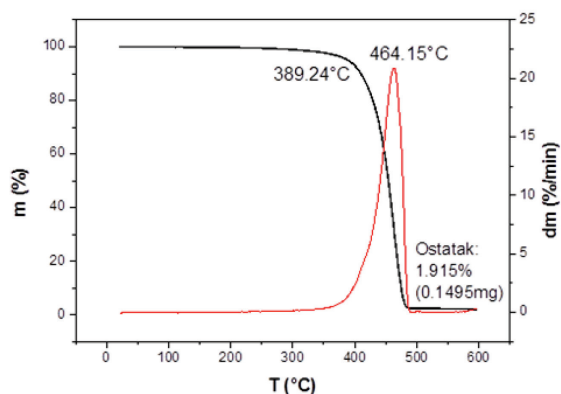
Slika 5. TG i DTG krivulje uzorka PE-LD/dumbir



Slika 2. TG i DTG krivulje uzorka PE-LD/cimet



Slika 3. TG i DTG krivulje uzorka PE-LD/zeleni čaj



Slika 4. TG i DTG krivulje uzorka PE-LD/ružmarin

Isto tako, uzorci pripremljeni s ružmarinom (slika 4) i đumbirom (slika 5) pokazuju višu temperaturu kod maksimalne brzine razgradnje što ukazuje na bolju toplinsku stabilnost u odnosu na čisti polietilen. S druge strane, uzorak polietilena pripremljen s zelenim čajem (slika 3) pokazuje $T_{max} = 450\text{ °C}$ što je za 11 °C niža temperatura u usporedbi s čistim polietilenom odnosno ispitivani uzorak toplinski je nestabilniji u odnosu na čisti polietilen. Kod pripreme polietilenskih filmova veliki problem predstavlja neodgovarajuća i nehomogena raspodjela bioaditiva u matrici polietilena što ima za posljedicu lošija svojstva krajnjeg materijala.

3.2. Mehanička svojstva

Iz literature (Utracki 1990; Fox & Allen 1985) je poznato da je velik broj polimera međusobno nemješljiv, a o mješljivosti odnosno o homogenosti višefaznih sustava ovise mehanička svojstva, a time i primjenska svojstva materijala. Da bi uzorak bio homogen, komponente u višefaznom sustavu moraju biti kompatibilne, što znači da međusobno moraju uspostavljati interakcije i tada su dodatak i/ili polimer niže koncentracije dobro dispergirani u polimernoj matrici.

Mehanička svojstva polimernih materijala karakteristični su parametri koji opisuju ponašanje materijala pod djelovanjem mehaničke sile i slabljenje materijala u uvjetima upotrebe. Tijekom skladištenja i korištenja, mehanička svojstva polimernih materijala se mijenjaju, a dinamika ovisi o vrsti i tipu materijala.

Ispitne epruvete pripremljenih uzoraka dimenzija (90 x 10 x 0.15) mm podvrgnute su mehaničkim ispitivanjima pri brzini kidanja od 50 mm/min te konstantnoj temperaturi od 23 °C s ciljem određivanja prekidnog naprezanja (σ) te prekidnog istezanja (ϵ). Dobivene vrijednosti su prikazane u tablici 1.

Iz tablice je vidljivo da se vrijednosti prekidnog naprezanja polietilenskih filmova pripremljenih uz dodatak bioaditiva razlikuju u usporedbi s vrijednostima čistog polietilena. Vrijednosti prekidne čvrstoće za uzorke polietilena pripremljenih s đumbirom i ružmarinom su neznatno niže u odnosu na čisti polietilen ($\sigma=3,45\text{ Nmm}^{-2}$) dok su za uzorke pripremljene sa zelenim čajem i cimetom vrijednosti prekidne čvrstoće više što ukazuje na povećanu čvrstoću ispitivanih uzoraka.

Tablica 1. Vrijednosti prekidnog naprežanja i prekidnog istežanja ispitivanih uzoraka

UZORAK	σ / Nmm ⁻²	ε / %
PE-LD čisti	3,45	139,42
PE-LD/cimet	4,53	71,42
PE-LD/zeleni čaj	4,44	54,46
PE-LD/ružmarin	3,02	51,82
PE-LD/đumbir	2,98	41,59

Prekidno istežanje i lomljivost (krtoost) su obrnuto proporcionalni što je vidljivo na uzorcima PE-LD/cimet i PE-LD/zeleni čaj gdje su vrijednosti prekidnog istežanja smanjene u odnosu na čisti polietilen, ali su zato vrijednosti prekidne čvrstoće porasle. Vrijednosti prekidnog istežanja ispitivanih uzoraka znatno su smanjene u odnosu na čisti polietilen. Smanjenje istežljivosti ne znači nužno pogoršanje svojstava jer je došlo do povećanja prekidne čvrstoće. Iz dobivenih vrijednosti za pretpostaviti je da se dodatkom bioaditiva sprečava gibljivost polimernih lanaca polietilena što u konačnici znatno utječe na istežljivost, ali i na čvrstoću.

Navedeno slabljenje mehaničkih svojstava može se objasniti nastankom mikronapuklina zbog dodatka antimikrobnih tvari na površinu polimernog filma.

3.3. Ispitivanje antimikrobnog djelovanja

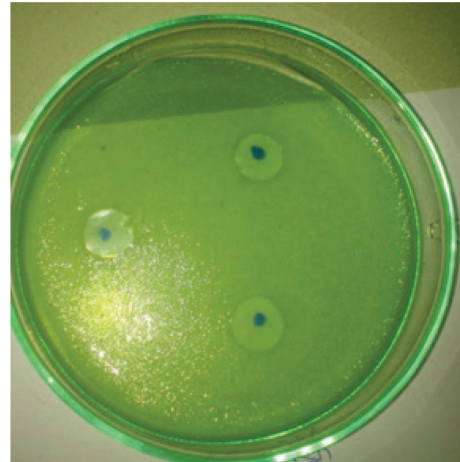
Da bi se ispitala antimikrobna djelotvornost začina u materijalima koji se koriste za pakiranje provedena su ispitivanja s rastom mješovite kulture mikroorganizama na hranjivoj podlozi. Iz literature je poznato da upotreba prirodnih antimikrobnih tvari, zajedno s nekim uobičajenim upotrebljivanim metodama za konzerviranje hrane (toplinsko tretiranje hrane, pakiranje u vakuumu, zamrzavanje) povećava djelotvornost ovih metoda (Boschetto *et al.* 2008; Cha & Chinnan 2004; Munoz-Bonilla & Fernandez-Garcia 2012; Han 2000; Qental *et al.* 2005).

Njihovo se antimikrobno djelovanje temelji na prisutnosti aktivnih komponenata u strukturi kao što su: fenoli, alkoholi, aldehidi, ketoni, esteri, eteri i ugljikovodici. Začini s izrazitim antimikrobnim djelovanjem, koji se već stoljećima upotrebljavaju kao prirodni konzervansi u pripremi hrane su: češnjak, cimet, klinčić, gorušica, đumbir, menta, ružmarin, origano, kadulja, majčina dušica, limun, naranča, čili i dr.

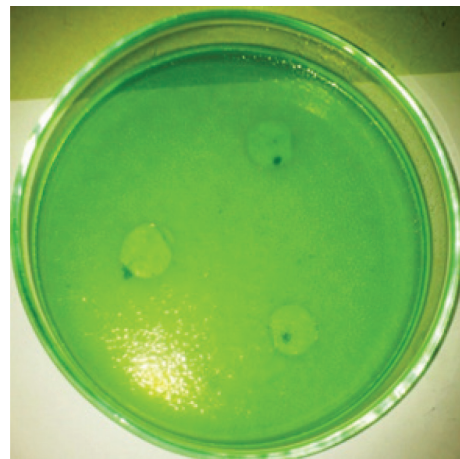
Na temelju takvih iskustava navedeni se začini u današnje vrijeme nastoje ukomponirati u ambalažu da bi njihovo antimikrobno djelovanje bilo što učinkovitije na produljenje trajnosti hrane. Pokazana je njihova učinkovitost na smanjenje rasta brojnih tipova gram-pozitivnih i gram-negativnih bakterija. Međutim, potrebno je osigurati uvjete za optimalno djelovanje antimikrobnih tvari kao što je odgovarajući pH, temperatura, količina kisika i sama koncentracija aktivne tvari. Antimikrobna aktivnost navedenih tvari temelji se na djelovanju na stanice bakterija na kojima ona uzrokuje strukturne i funkcionalne defekte. Rezultati prikazani na slici 4 pokazuju da najveću antimikrobnu aktivnost pokazuje polietilenski film pripremljen s cimetom kao antimikrobnom tvari jer su na

njemu primijećena mjesta gdje nije došlo do rasta bakterija. Kod ostalih ispitivanih uzoraka nije utvrđeno antimikrobno djelovanje.

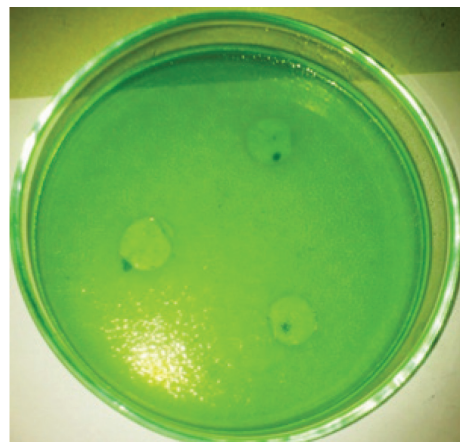
Može se zaključiti da je količina dodanog začina na polimernom filmu nedovoljna da bi imala povećano antimikrobno djelovanje te da bi trebalo koristiti ove vrste prirodnih konzervansa u većoj koncentraciji ili upotrijebiti njihova eterična ulja koja sadrže puno veću koncentraciju aktivnih tvari.



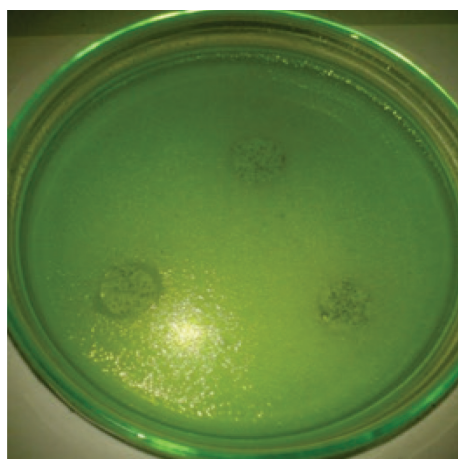
a) čisti polietilen



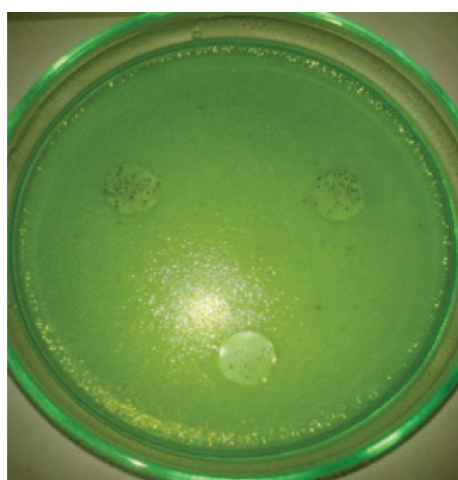
b) PE-LD/ružmarin



c) PE-LD/đumbir



d) PE-LD/zeleni čaj



e) PE-LD/cimet

Slika 4. Ispitivani uzorci

4. ZAKLJUČAK

Termogravimetrijskom analizom utvrđeno je da dodatak bioaditiva polietilenu utječe na toplinsku stabilnost ispitivanih uzoraka te da se toplinska razgradnja polietilenskih filmova odvija u jednom razgradnom stupnju. Mehanička ispitivanja pokazala su porast vrijednosti prekidnih čvrstoća polietilenskih filmova u odnosu na čisti polietilen dok je prekidno istezanje znatno smanjeno. Filmovi pripremljeni s dodatkom bioaditiva pokazuju smanjen ukupan broj živih stanica bakterija u usporedbi s čistim polietilenskim filmom što pokazuje da se ovi aditivi mogu učinkovito primjenjivati kao prirodni konzervansi, ali u većim koncentracijama.

5. LITERATURA

Boschetto DL, Lerin L, Cansian R, Castella Pergher SB, Di Luccio M (2008) Preparation and antimicrobial activity of polyethylene composite films with silver exchanged zeolite-Y. *Chem Eng J* 204-206:210-216

Cha DS, Chinnan MS (2004) Biopolymer-based antimicrobial packaging. *Rev Food Sci Nutr* 44:223-237.

Fox DW, Allen RB (1985) Compatibility. U: Mark HF, Bikales NM, Overberger CG, Menges G (ur.) *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, Vol. 3, John Wiley & Sons, New York

Goodman KW (1986) Ethylene Polymers. U: Mark HF, Bikales NM, Overberger CG, Menges G (ur.) *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, Vol 6, John Wiley & Sons, New York

Grassie N, Scott G (1985) *Polymer Degradation and Stabilisation*. Cambridge University Press, Cambridge

Han JH (2000) Antimicrobial food packaging. *Food Technol* 54:56-65

Hrnjak-Murčić Z (2010) Ambalažni polimerni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb

Munoz-Bonilla M, Fernandez-Garcia M (2012) Polymeric materials with antimicrobial activity. *Prog Polym Sci* 37:281-339

Peterson JD, Vyazovkin S, Wight CA (2001) Kinetics of the Thermal and Thermo-Oxidative Degradation of Polystyrene, Polyethylene and Poly(propylene). *Macromol Chem Phys* 202:775-784

Pravilnik o ambalaži i ambalažnom otpadu, <http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/289416.html>. Citirano 16.01. 2014

Quental AC, Hanamoto LS, Felisberti MI (2005) Linear low-density polyethylene characterization II: fractionation by multiple-step isothermal crystallization from the melting state. *Polim Cienc Tecnol* 15:281-288

Rhim JW, Park HM, Ha CS (2013) Bio-nanocomposites for Food Packaging Applications. *Prog Polym Sci* 38: 1629-1652

Stipanelov Vrandečić N (2012) Ambalaža, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split

Tajkarima MM, Ibrahim SA, Cliver DO (2010) Antimicrobial herb and spice compounds in food. *Food Control* 21:1199-1218

Utracki LA (1990) *Polymer Alloys and Blends*. Carl Hanser, New York

INTEGRALNI PRISTUP RJEŠAVANJU PROBLEMATIKE INDUSTRIJSKIH OTPADNIH VODA

AN INTEGRATED APPROACH TO THE INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT

Dinko Vujević¹, Aleksandra Mikić², Sandra Lenček³, Dragana Dogančić¹, Saša Zavrtnik¹, Vitomir Premur¹, Aleksandra Anić Vučinić¹

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

² Lotus 91 d.o.o., Braće Radić 103a, Jalkovec, HR-42000 Varaždin, HRVATSKA

³ Varaždinska županija, Upravni odjel za prostorno uređenje i graditeljstvo, Franjevački trg 7, HR-42000, Varaždin, HRVATSKA

Sažetak: Industrijske otpadne vode predstavljaju značajan ekološki problem zbog sadržaja teško razgrađivih i toksičnih spojeva te se kao takve ne mogu ispustiti u prirodne prijamnike bez prethodne odgovarajuće obrade. Kako niti jedna od raspoloživih metoda obrade nije idealna tj. uz neke prednosti postoje i ograničenja njihove samostalne primjene, metode se mogu kombinirati u tzv. integralnim procesima. U ovom je radu za obradu industrijske otpadne vode nastale u procesima čišćenja dimnih plinova (DPV), kao potencijalno učinkovite metode obrade ovakvog tipa industrijskih otpadnih voda, studirana primjena koagulacije/flokulacije, adsorpcije te njihove kombinirane primjene. Kao koagulant/flokulant ispitivani su aluminijev(III) sulfat i željezov(III) klorid, a aktivni ugljen kao adsorbens. Kvaliteta obrađene otpadne vode procijenjena je određivanjem stupnja uklonjenog zamućenja i sadržaja ukupnog organskog ugljika. Kao optimalni parametri integralnog procesa obrade DPV otpadne vode odabrani su koncentracija željezovog(III) klorida u iznosu od 0,37 mmol/dm³ i pH 5. Pri ovim je uvjetima uklonjeno 62,7 % zamućenja i 9,2 % ukupnog organskog ugljika. Tako obrađena otpadna voda podvrgnuta je obradi procesom adsorpcije uz primjenu 0,1 g/dm³ aktivnog ugljena uz vrijeme miješanja u iznosu od 30 minuta čime je uklonjeno 91,3 % zamućenja i 12,8 % ukupne organske tvari u odnosu na početne vrijednosti.

Cljučne riječi: industrijske otpadne vode, obrada otpadnih voda, koagulacija/flokulacija, adsorpcija, integralni pristup obrade.

Abstract: Industrial wastewater presents significant environmental issue due to the content of persistent and toxic compounds so it cannot be discharged into the natural recipients without prior adequate treatment. Since none of available wastewater treatment methods is ideal, i.e. with certain advantages they have limitations of the application, so they can be combined in the so called integrated processes. In this work for the treatment of industrial wastewater generated in the processes of exhaust gasses purification (EG), as potentially efficient treatment methods for such type of industrial wastewater, the application of the coagulation/flocculation, adsorption as well as its combined use have been studied. As coagulants/flocculants aluminium sulphate and ferric chloride were examined and activated carbon as adsorbent. The quality of the treated water was estimated on the basis of the determination of the turbidity extent and total organic carbon content. As the optimal parameters of the integrated process in EG wastewater treatment, concentration of ferric chloride of 0.37 mmol/dm³ and pH 5 were chosen. In this case 97 % of the turbidity and 9.2 % of the total organic carbon have been removed. This wastewater has been subjected to the final treatment step by the adsorption using 0.1 g/dm³ of activated carbon whereas 91.3 % of the turbidity and 12.8 % of total organic carbon content in comparison with initial parameters were removed after 30 minutes.

Keywords: industrial wastewater, wastewater treatment, coagulation/flocculation, adsorption, an integrated treatment approach.

Received: 23.01.2014 / Accepted: 30.04.2014

Znanstveni rad

1. UVOD

Povećanje svjetske populacije kao i rastuća proizvodnja različitih proizvoda koji omogućavaju sve moderniji način života, u mnogim zemljama uzrokuje nastanak sve veće količine otpada koji opterećuje mehanizme prirodnog pročišćavanja. Pri tome poseban problem predstavljaju industrijske otpadne vode zbog toga što sadrže teško razgrađive i toksične organske spojeve i teške metale. Ukoliko se takve otpadne vode ispuste u prirodne prijamnike (potoci, rijeke, jezera i mora) bez prethodne odgovarajuće obrade mogu ozbiljno

narušiti ravnotežu u biljnom i životinjskom svijetu te imati negativne posljedice na ljudsko zdravlje. Osim toga ispuštanje industrijskih otpadnih voda u razvijenim zemljama svijeta ograničeno je sve strožom zakonskom regulativom. Stoga je iznalaženje odgovarajuće metode za obradu pojedinog tipa industrijske otpadne vode vrlo važno i pridaje mu se veliki značaj (Tušar 2009).

Općenito gledajući za obradu industrijskih otpadnih voda na raspolaganju su biološki, fizikalno-kemijski i kemijski postupci obrade. Niti jedna od ovih metoda nije idealna tj. uz neke prednosti postoje i ograničenja njihove samostalne primjene. Kako bi se uklonili eventualni

nedostaci te poboljšala kvaliteta obrađene otpadne vode ove se metode mogu kombinirati u tzv. integralnim procesima primjenjivim u obradi industrijskih otpadnih voda iz različitih industrija (Ayoub *et al.* 2011; Konsowa *et al.* 2010; Appollo *et al.* 2013; Mehta & Chavan 2009).

Svrha ovog rada bila je u laboratorijskom mjerilu istražiti mogućnost obrade industrijske otpadne vode nastale u procesu pročišćavanja dimnih plinova pri obradi tiskanih pločica u mikrovalnoj peći i to integralnim pristupom uz primjenu koagulacije/flokulacije i adsorpcije kao završnog stupnja obrade otpadne vode. Uvidom u znanstvenu literaturu nisu pronađeni radovi koji prikazuju problematiku obrade ovog tipa otpadnih voda a pogotovo ne primjenu koagulacije/flokulacije te adsorpcije na aktivnom ugljenu odnosno integralni pristup u pročišćavanju otpadnih voda nastalih pri pročišćavanju dimnih plinova u obradi tiskanih pločica u mikrovalnoj peći.

2. INDUSTRIJSKE OTPADNE VODE

Industrijske otpadne vode nastaju u tvornicama i industrijskim pogonima nakon upotrebe vode u procesu proizvodnje, kao i prilikom pranja aparata, uređaja i dr., tj. u industrijske otpadne vode ubrajaju se sve otpadne vode koje nastaju u tehnološkim postupcima osim sanitarnih otpadnih voda i oborinskih voda. Danas postoji veliki broj različitih tipova industrijskih otpadnih voda, čije karakteristike ovise o tehnologiji same proizvodnje. Pojedine industrijske otpadne vode mogu sadržavati sastojke koji su otrovni ili teško razgradivi i interferiraju s florom i faunom ali isto tako utječu i na čovjeka. Ti sastojci u otpadnim vodama obuhvaćaju teške metale, kiseline, lužine, naftu i naftne derivate, masti i mineralna ulja, radioaktivne izotope, sintetičke i kemijske spojeve, odnosno tu se ubrajaju svi oni sastojci koje ne sadržavaju prirodne vode (Tušar 2009).

Prije ispuštanja industrijskih otpadnih voda u gradsku kanalizacijsku mrežu ili prirodni prijemnik, potrebno ih je obraditi nekom od odgovarajućih metoda obrade kako bi se postigle vrijednosti pokazatelja onečišćenja ispod zakonom propisanih vrijednosti. Stoga, obrada otpadnih voda započinje odmah nakon upotrebe vode. U tu svrhu se otpadna voda prikuplja i podvrgava fizikalnim, kemijskim i/ili biološkim procesima obrade prije nego što se vrati u okoliš. Vrsta procesa koji će biti primijenjen za obradu otpadne vode ovisi o načinu upotrebe vode i mjestu gdje će obrađena otpadna voda biti ispuštena (Tušar 2009).

2.1. Fizikalno-kemijski procesi

Fizikalno-kemijski procesi obrade otpadnih voda obuhvaćaju čitav niz procesa od kojih su za obradu industrijskih otpadnih voda najznačajniji koagulacija/flokulacija i adsorpcija.

Koagulacija je proces u kojem koloidne čestice, otopljene u nekom kapljevitom sustavu, gube svoju stabilnost te oblikuju nakupine koje sadrže više čestica. Kad takve nakupine postignu određenu veličinu ne

karakterizira ih više Brown-ovo gibanje pa se zbog djelovanja sile teže talože i izdvajaju iz disperzne faze. Vremensko razdoblje u kojem su koloidni sustavi stabilni može iznositi od nekoliko sekundi pa do nekoliko godina. Nakupine koloidnih čestica, nastale pri koagulaciji, često se nazivaju flokule pa je i sam proces dobio naziv flokulacija. Neki autori potpuno izjednačavaju značenje izraza koagulacija i flokulacija, dok ih drugi razlikuju. Prema ovim drugima, flokulacija je proces u kojem se čestice međusobno privlače slabim silama ili pak povezuju u flokule preko adsorbiranih molekula flokulanta makromolekularne prirode.

Koagulacija je u uskoj vezi sa stabilnošću koloidnih otopina i nastupa samo u slučaju kad je stabilnost sustava narušena (De Gennes 1987). Koagulacija/flokulacija podrazumijeva primjenu organskih (polimeri) ili anorganskih koagulanata/flokulanata (mineralne soli polivalentnih kationa) kojima se narušava stabilnost sustava što rezultira nastankom flokula i taloženjem (Amuda & Alde 2006; Aguilar *et al.* 2005; De Gennes 1987; Degremont 1991). Željezove(III) soli, najčešće $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$ i $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$, vrlo često se upotrebljavaju kao koagulant pri obradi različitih tipova otpadnih voda (Amuda & Alde 2006; Verma *et al.* 2010; Garcia-Heras & Forster 1989; Lefebvre & Legube 1990).

Parametri procesa koagulacije/flokulacije uključuju veličinu i oblik posude, brzinu i vrijeme brzog miješanja, brzinu i vrijeme sporog miješanja, pH vrijednost sustava te koncentraciju koagulacijskog sredstva. Za određivanje optimalnih parametara koagulacije/flokulacije pri obradi otpadne vode najšire upotrebljavani postupak je metoda "jar test", kojom se mogu brzo i ekonomično dobiti važni podaci za projektiranje postrojenja te vođenje i modeliranje procesa u industrijskom mjerilu. Još pred nekoliko desetljeća objavljena je nekolicina radova o usavršavanju "jar test" metode (Argman 1971; Griffiths & Williams 1972).

Radovi uključuju istraživanje procesa flokulacije, brzog miješanja i njihovog utjecaja na taloženje. Prednost procesa koagulacije/flokulacije u komercijalnoj izvedbi je njeno relativno jednostavno izvođenje i kratkoća vremena potrebna za provođenje procesa. Glavni nedostatak je velika količina nastalog mulja koji predstavlja sekundarni otpad i kojeg je potrebno naknadno zbrinjavati što iziskuje dodatna financijska sredstva.

Adsorpcija je jedan od fizikalno-kemijskih procesa pri kojem se tvari iz tekuće faze vežu na čvrstu. Sam proces uključuje povećanje koncentracije određene komponente (adsorbata) na površini čvrste faze (adsorbens). Adsorbens je čvrsta tvar koja ima svojstvo vezanja molekula plina ili molekula iz otopine na svojoj površini. To je naročito izraženo kod poroznih tvari čija je specifična aktivna površina znatno veća od geometrijske površine (aktivni ugljen, silikagel, zeoliti...) (Faust & Aly 1999).

Prednost procesa adsorpcije u komercijalnoj primjeni je relativno jednostavno provođenje procesa a glavni nedostatak odnosi se na cijenu adsorbensa (aktivni ugljen) i njegovo zbrinjavanje nakon upotrebe.

3. MATERIJALI I METODE

S obzirom da je svrha ovog rada istraživanje mogućnosti integralnog pristupa u obradi industrijske otpadne vode nastale u procesu pročišćavanja dimnih plinova, kao potencijalno učinkoviti proces obrade ovog tipa otpadne vode, studirana je primjena koagulacije/flokulacije i adsorpcije kao završnog stupnja obrade industrijske otpadne vode u laboratorijskom mjerilu. U tu je svrhu industrijska otpadna voda predobrađena procesom kogaulacije/flokulacije. Dobiveni supernatant je zatim podvrgnut procesu adsorpcije u svrhu poboljšanja kvalitete obrađene vode. Kvaliteta obrađene otpadne vode procijenjena je određivanjem stupnja uklonjenog zamućenja i stupnja uklonjenog ukupnog organskog ugljika. Zamućenje je određeno uz pomoć Turbidimetra 2100 P (HACH) koji zamućenje izražava u nefelometrijskim jedinicama zamućenja (Nephelometric Turbidity Units – NTU). Sadržaj ukupnog organskog ugljika u mg/dm³ određen je pomoću TOC-V_{CPN}, Total Organic Carbon Analyser-a (Shimadzu). Ove analize provedene su u Laboratoriju za Geokemiju okoliša, Geotehničkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu.

Industrijska otpadna voda studirana u okviru ovog rada potječe iz procesa pirolitičke razgradnje tiskanih pločica u mikrovalnoj peći. Tiskane pločice se obrađuju na ovaj način u svrhu regeneracije plemenitih metala. U tehnološkom procesu regeneracije plemenitih metala nastaju dvije vrste otpadnih voda. Jedna otpadna voda potječe iz procesa obrade mulja, a druga iz procesa pročišćavanja dimnih plinova. Za potrebe ovog istraživanja otpadna voda iz procesa čišćenja mulja je označena oznakom MV, a otpadna voda od ispiranja dimnih plinova oznakom DPV.

Sve kemikalije korištene u ovom radu bile su analitičkog stupnja čistoće, proizvedene od strane Kemike, Zagreb te su upotrijebljene bez daljnjeg pročišćavanja. Destilirana voda korištena tijekom istraživanja proizvedena je u Laboratoriju za Geokemiju okoliša, Geotehničkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu. pH vrijednost korištene vode iznosila je 5 a vodljivost 0,8 μS/cm.

Miješanje odnosno homogenost otopina osiguravana je pomoću laboratorijske miješalice (IKA® KS 130 basic) a pH vrijednost je mjerena pH-metrom (Sension 156, HACH).

Svi eksperimenti ponovljeni su tri puta. Dobiveni rezultati se nisu značajnije razlikovali.

Detaljna analiza kemijskog sastava MV otpadne vode provedena je u Laboratoriju LASI S.r.L., u mjestu Pieve Al Toppo u Italiji. Rezultati ove analize prikazani su u Tablici 1. Sastav DPV otpadne vode određen je u Laboratoriju Cabro SpA, u mjestu Arezzo, također u Italiji. Rezultati analize prikazani su Tablicom 2. Određivanje pH vrijednosti, zamućenja i sadržaja ukupnog organskog ugljika u MV i DPV otpadnoj vodi provedeno je u Laboratoriju za geokemiju okoliša, Geotehničkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu. Rezultati ovih analiza prikazani su Tablicom 3.

Tablica 1. Analiza kemijskog sastava MV otpadne vode

SASTAV	KONCENTRACIJA, mg/kg
Benzen	0,67
Drugi aromatski ugljikovodici	< 1
Organohalogeni spojevi	< 0,5
Naftalen	36,8
Acenaftilen	4,61
Acenaften	7,7
Fluoren	43,1
Fenantren	73
Antracen	7,7
Fluoranten	12,2
Piren	13,8
Benzo (a) antracen	3,83
Crisene	10
Benzo (b) fluoranten	2,75
Benzo (k) fluoranten	1,13
Benzo (j) fluoranten	1,57
Benzo (e) piren	2,98
Benzo (a) piren	1,14
Indeno (1, 2, 3, -cd) piren	0,318
Dibenzo (a, h) antracen	0,153
Benzo(g, h, i) perilen	0,301
Drugi policiklički aromatski ugljikovodici	< 0,1

Tablica 2. Analiza kemijskog sastava DPV otpadne vode

SASTAV	KONCENTRACIJA, mg/kg
Bakar	2,7
Kadmij	0,1
Nikal	3,1
Olovo	9,5
Cink	18,4

Tablica 3. Početni pokazatelji onečišćenja otpadne vode

TIP INDUSTRIJSKE OTPADNE VODE	pH	NTU	TOC, mg/dm ³
Otpadna voda iz procesa čišćenja mulja (MV)	3,18	2,25	11280
Otpadna voda iz procesa čišćenja dimnih plinova (DPV)	4,37	4,15	4413,5

3.1. Koagulacija/flokulacija

Koagulacija/flokulacija otpadne vode istraživane u ovom radu provedena je uz aluminijev(III) sulfat i željezov(III) klorid u laboratorijskim čašama volumena 100 mL. Na sobnoj temperaturi je 50 mL industrijske otpadne vode podvrgnuto brzom miješanju (240 okretaja u minuti) kroz jednu minutu pa je zatim brzina miješanja smanjena na 160 okretaja u minuti. Ukupno vrijeme brzog i sporog miješanja iznosilo je 15 minuta. Varirana je koncentracija koagulant (0,37 mmol/dm³; 1,11 mmol/dm³; 1,85 mmol/dm³; 3,7 mmol/dm³; 11,1 mmol/dm³ i 18,5 mmol/dm³) i pH vrijednost otopine (3,5; 4; 4,5; 5). Podešavanje pH vrijednosti sustava provedeno je odmah nakon dodatka koagulant (Amuda & Alde 2006; Aguilar *et al.* 2005) s otopinom natrijevog hidroksida koncentracije 5 mol/dm³ i kloridnom kiselinom koncentracije 2 mol/dm³. Tako obrađena otpadna voda ostavljena je preko noći u svrhu eventualnog taloženja pod utjecajem gravitacije. Uzorak supernatanta je podvrgnut daljnjoj analizi u svrhu određivanja zamućenja i sadržaja ukupnog organskog ugljika.

3.2. Adsorpcija

Učinkovitost procesa adsorpcije onečišćivala iz industrijske otpadne vode ispitivana je pri različitim odvagama adsorbensa. Kao adsorbens korišten je aktivni ugljen. Aktivni ugljen je korišten bez daljnjeg pročišćavanja (Konsowa *et al.* 2010; Dialynas & Diamadopoulou 2008; Mehta & Chavan 2009; Ayoub *et al.* 2011). Proces adsorpcije vođen je kod sobne temperature, u laboratorijskim čašama od 100 mL, uz volumen MV odnosno DPV otpadne vode od 50 mL uz početne pH vrijednosti (Tablica 3) i miješanje na mehaničkoj miješalici pri 240 okretaja u minuti. Vrijeme miješanja iznosilo je 30, 60, 120 minuta i 20 sati. Prije daljnje analize u svrhu određivanja stupnja zamućenja i sadržaja ukupnog organskog ugljika, uzorci su profiltrirani kroz filter papir (Spezialpapierfabrik Niederschlag, No. 390 Φ 11 cm) kako bi se odvojila čvrsta faza od kapljevine.

3.3. Ekonomska analiza

Ekonomska analiza je provedena upotrebom jednostavnog izraza koji se uobičajeno koristi za izračunavanje isplativosti procesa korištenih pri obradi otpada i zaštiti okoliša (Rubin & Davidson 2001).

$$Isplativost = \frac{Trošak}{Postotak uklonjenog oneč.} \quad (1)$$

Što je manji brojčani iznos omjera isplativosti, manje je novca potrebno za smanjivanje emisija onečišćivala.

U razmatranje su u obzir uzete trenutno važeće cijene korištenih kemikalija p.a. stupnja čistoće iz kataloga (Sigma-Aldrich), prikazanih Tablicom 4. te cijena električne energije u iznosu od 0,85 kn/kWh (HEP 2014).

Cijene kemikalija u korištenom katalogu izražene su u eurima. Preračunavanje u kune provedeno je prema srednjem tečaju na dan 05. travnja 2014. (HNB 2014) kada je vrijednost 1 eura iznosila 7,643652 kuna.

Tablica 4. Cijene korištenih kemikalija

KEMIKALIJA	CIJENA, kN/kg
FeCl ₃ ×6H ₂ O	867,55
NaOH	294,00
HCl	386,07
Al ₂ (SO ₄) ₃ ×18H ₂ O	605,38
Aktivni ugljen	356,19

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Optimiranje procesa koagulacije/flokulacije

U svrhu određivanja najučinkovitijeg koagulant, njegove količine kao i pH vrijednosti, optimiran je proces koagulacije/flokulacije za obradu otpadne vode iz procesa čišćenja mulja (MV). Provedena je serija eksperimenata ("jar testovi"), u laboratorijskim čašama, volumena 100 mL, pri sobnoj temperaturi, uz primjenu brzog i sporog miješanja na mehaničkoj miješalici. Ispitivane pH vrijednosti odgovarale su onima koje su neki autori koristili pri istraživanju učinkovitosti aluminijevog(III) sulfata i željezovog(III) klorida u obradi otpadnih voda procesom koagulacije/flokulacije (Verma *et al.* 2010; Meteš *et al.* 2004). Koncentracije koagulanata i pH vrijednost sustava su varirane u svrhu određivanja optimalnih vrijednosti, tj. utvrđivanja onih vrijednosti pri kojima će biti postignuto jasno odjeljivanje faza (talog-supernatant) odnosno ostvaren maksimalni stupanj uklanjanja zamućenja i sadržaja ukupnog organskog ugljika uz istovremenu upotrebu minimalne količine koagulant što je i svrha provođenja ("jar testa"). Inače, pojava koagulacije/flokulacije je u uskoj vezi sa smanjenom vrijednošću zeta potencijala sustava koji opet ovisi o pH. Za postizanje optimalne vrijednosti zeta potencijala u sustavu, potrebno je varirati pH (Woodard 2001).

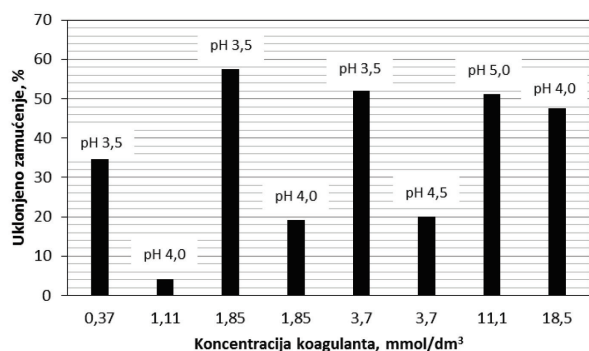
Eksperimenti optimiranja procesa koagulacije/flokulacije onečišćenja u otpadnoj vodi MV provedeni su uz upotrebu koagulanata aluminijevog(III) sulfata i željezovog(III) klorida s volumenom otpadne vode 50 mL pri različitim pH vrijednostima. Prvi set eksperimenata koagulacije/flokulacije onečišćenja u MV otpadnoj vodi proveden je uz upotrebu aluminijevog(III) sulfata. Uočeno je da nije došlo do stvaranja flokula odnosno taloženja kod niti jedne ispitivane koncentracije pa su daljnja ispitivanja provedena uz korištenje željezovog(III) klorida kao potencijalnog koagulant/flokulant za obradu studirane otpadne vode.

Naredni set eksperimenata proveden je uz upotrebu željezovog(III) klorida. Kod svih ispitivanih koncentracija vrlo brzo, nakon dodatka koagulant u MV

otpadnu vodu, vidljivo je stvaranje flokula što je u nekim slučajevima rezultiralo stvaranjem taloga tj. stvaranjem jasne granice između faza.

Rezultati dobiveni optimiranjem procesa koagulacije/flokulacije onečišćenja u MV otpadnoj vodi uz upotrebu željezovog(III) klorida prikazani su grafički (Slika 1). Radi preglednosti, prikazani su samo najbolji rezultati tj. one pH vrijednosti i koncentracije koagulant/flokulanta kod kojih su postignuti najviši stupnjevi uklonjenog zamućenja. Inače, početne vrijednosti zamućenja (Tablica 3) u MV otpadnoj vodi su unutar granica koje propisuje zakonska regulativa (Pravilnik NN 125/13) dok je za DPV otpadnu vodu ta vrijednost blago prekoračena.

Iz slike je vidljivo da je maksimalni stupanj uklanjanja zamućenja u iznosu od 57,3 % dobiven pri koncentraciji željezovog (III) klorida od 1,85 mmol/dm³ uz pH vrijednost sustava 3,5. Pri ovim uvjetima uklonjeno je 8,4 % ukupnog organskog ugljika (Tablica 5).

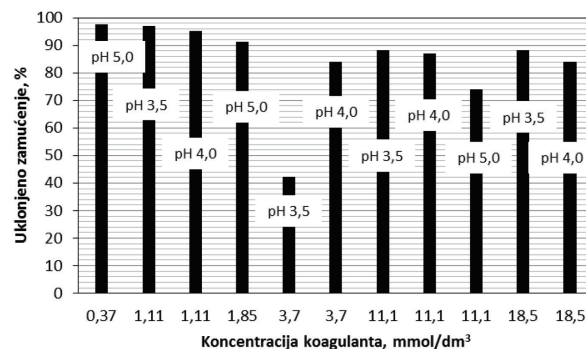


Slika 1. Optimiranje procesa koagulacije/flokulacije za obradu MV otpadne vode uz upotrebu željezovog(III) klorida

Idući set eksperimenata proveden je u svrhu optimiranja procesa koagulacije/flokulacije onečišćenja u otpadnoj vodi iz procesa čišćenja dimnih plinova (DPV) uz upotrebu željezovog(III) klorida. Također je vrlo brzo nakon dodatka koagulant uočeno stvaranje flokula koje su nakon djelovanja gravitacijske sile, u nekim slučajevima rezultirale nastankom taloga, tj. stvaranjem jasne granice između faza.

Rezultati i ovih pokusa prikazani su grafički (Slika 2). I ovdje su radi preglednosti, prikazani samo najbolji rezultati tj. one pH vrijednosti i koncentracije koagulant/flokulanta kod kojih su postignuti najviši stupnjevi uklonjenog zamućenja.

Iz slike je vidljivo da je maksimalni stupanj uklanjanja zamućenja u iznosu od 97,4% postignut pri koncentraciji željezovog(III) klorida od 0,37 mmol/dm³ uz pH vrijednost sustava 5. Pri ovim uvjetima uklonjeno je 9,2 % ukupnog organskog ugljika (Tablica 5).



Slika 2. Optimiranje procesa koagulacije/flokulacije za obradu DPV otpadne vode uz upotrebu željezovog(III) klorida

Tablica 5. Stupanj uklonjenog ukupnog organskog ugljika (TOC) u studiranim procesima

PROCES	PROCESNI UVJETI	STUPANJ UKLONJENOG TOC-a, %
Koagul./flokul. MV otpadne vode	$c(\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}) = 1,85 \text{ mM/dm}^3$ $\text{pH} = 3,5$	8,4
Adsorpcija MV otpadne vode	$\gamma(\text{akt. uglj.}) = 0,1 \text{ g/dm}^3$ $t = 60 \text{ min.}$ $\text{pH} = 3,18$	2,0
Koagul./flokul. DPV otpadne vode	$c(\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}) = 0,37 \text{ mM/dm}^3$ $\text{pH} = 5$	9,2
Adsorpcija DPV otpadne vode	$\gamma(\text{akt. uglj.}) = 0,1 \text{ g/dm}^3$ $t = 30 \text{ min.}$ $\text{pH} = 4,37$	12,7
Koagul./flokul. DPV otpadne vode + adsorpcija	$c(\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}) = 0,37 \text{ mM/dm}^3$ $\text{pH} = 5$ $t = 30 \text{ min.}$	9,2 + 12,8

4.2. Optimiranje procesa adsorpcije

U svrhu određivanja optimalne količine adsorbensa za postizanje maksimalnog učinka adsorpcije onečišćenja u otpadnoj vodi iz procesa čišćenja mulja (MV) te iz procesa čišćenja dimnih plinova (DPV), provedena je serija eksperimenata uz upotrebu četiri različite koncentracije aktivnog ugljena. Adsorpcijski testovi su provedeni pri sobnoj temperaturi, uz volumen otpadne vode od 50 mL pri koncentraciji aktivnog ugljena od 0,1; 0,2; 0,5 i 1,0 g/dm³, bez dodatnog podešavanja pH (Tablica 3). Vrijeme miješanja iznosilo je 30, 60, 120 minuta i 20 sati. Nakon kontakta otpadne vode s adsorbensom, uzorci su profiltrirani, a filtrat je podvrgnut određivanju stupnja zamućenja i sadržaja ukupnog organskog ugljika.

U Tablici 6. prikazani su rezultati optimiranja procesa adsorpcije onečišćenja otpadne vode iz procesa čišćenja mulja (MV). Kao najučinkovitiji proces adsorpcije odabran je pokus u kojem je uz koncentraciju adsorbensa od 0,1 g/dm³ nakon 60 minuta uklonjeno gotovo 70 % zamućenja. Pri ovim procesnim uvjetima uklonjeno je 2,0

% ukupnog organskog ugljika (Tablica 5). Aktivni ugljen nije dodatno pročišćavan prije upotrebe (Konsowa *et al.* 2010; Dialynas & Diamadopoulou 2008; Mehta & Chavan 2009; Ayoub *et al.* 2011) Relativno slaba učinkovitost uklanjanja organske tvari pri ovim procesnim uvjetima može se tumačiti činjenicom se u procesu adsorpcije istovremeno odvijala i desorpcija organske tvari u sustav.

Tablica 6. Optimiranje procesa adsorpcije za obradu otpadne vode iz procesa pročišćavanja mulja (MV) uz upotrebu aktivnog ugljena

KONCENTRACIJA AKTIVNOG UGLJENA, g/dm ³	UKLONJENO ZAMUĆENJE, %		
	VRIJEME MIJEŠANJA, min.		
	60	120	1200
0,1	69,8	81,3	74,2
0,2	70,7	76,9	81,3
0,5	73,3	75,6	76
1,0	77,3	64,4	69,3

U Tablici 7. prikazani su rezultati optimiranja procesa adsorpcije onečišćenja otpadne vode iz procesa čišćenja dimnih plinova (DPV). Kao najučinkovitiji proces adsorpcije odabran je pokus u kojem je uz koncentraciju adsorbensa od 0,1 g/dm³ nakon 30 minuta uklonjeno 92 % zamućenja. Pri ovim procesnim uvjetima uklonjeno je 12,7 % ukupnog organskog ugljika (Tablica 5). Veća uspješnost uklonjenog ukupnog organskog ugljika u DPV otpadnoj vodi u odnosu na MV otpadnu vodu može se pripisati činjenici da je MV otpadna voda sadržavala veći stupanj ukupne organske tvari u odnosu na DPV otpadnu vodu (Tablica 3).

Tablica 7. Optimiranje procesa adsorpcije za obradu otpadne vode iz procesa pročišćavanja dimnih plinova (DPV) uz upotrebu aktivnog ugljena

KONCENTRACIJA AKTIVNOG UGLJENA, g/dm ³	UKLONJENO ZAMUĆENJE, %		
	VRIJEME MIJEŠANJA, min.		
	30	60	120
0,1	92,3	89,4	81,2
0,2	91,1	93,0	91,1
0,5	88,0	92,5	88,0
1,0	92,1	91,6	84,3

4.3. Obrada otpadne vode kolagulacijom/flokulacijom i adsorpcijom

Iz prethodnih poglavlja je razvidno da dobiveni rezultati ostavljaju prostora za poboljšanje u smislu povećanja eko-učinkovitosti. Naime, treba svakako imati na umu da procesom koagulacije/flokulacije nastaje talog, odnosno mulj koji predstavlja sekundarni otpad i kojeg u realnom procesu obrade otpadne vode koagulacijom/flokulacijom treba zbrinuti što iziskuje dodatni angažman vremenskih, prostornih i novčanih resursa. Također i proces adsorpcije sam po sebi ima

nedostatke u smislu cijene adsorbensa, njegove regeneracije i njegovog zbrinjavanja nakon upotrebe.

Stoga je u okviru ovog istraživanja proveden set eksperimenata s ciljem utvrđivanja primijenjivosti integralnog pristupa u rješavanju problematike pročišćavanja obrade otpadne vode na način da se uz upotrebu manje količine koagulanta/flokulanta postigne relativno zadovoljavajući stupanj obrade uz minimalno nastajanje taloga. Na taj će način za završni stupanj obrade otpadne vode prethodno obrađene procesom koagulacije/flokulacije biti potrebno utrošiti manje adsorpcijskog sredstva. U tu je svrhu uzet supernatant dobiven obradom otpadne vode iz procesa čišćenja dimnih plinova (DPV) uz najmanju koncentraciju željezovog(III) klorida tj. 0,37 mmol/dm³ i pH vrijednost koja je najbliža početnoj pH vrijednosti DPV otpadne vode tj. pH 5. Pri ovim je uvjetima uklonjeno 97 % zamućenja i 9,2 % ukupnog organskog ugljika (Slika 2, Tablica 5).

DPV voda obrađena na ovaj način podvrgnuta je obradi procesom adsorpcije uz primjenu 0,1 g/dm³ aktivnog ugljena i vrijeme miješanja u iznosu od 30 minuta jer su se ovi procesni parametri pokazali kao najučinkovitiji za postizanje najbolje kvalitete obrađene vode procesom adsorpcije (Tablica 7). Vrijednost zamućenja u ovako obrađenoj otpadnoj vodi tj. otpadnoj vodi obrađenoj integralnim pristupom smanjena je za 91,3 % u odnosu na početnu vrijednost DPV otpadne vode. Postignuti stupanj uklanjanja ukupne organske tvari iznosio je 12,8 % u odnosu na početnu vrijednost DPV otpadne vode (Tablica 5).

4.3. Ekonomska analiza studiranih procesa obrade industrijske otpadne vode

U svrhu određivanja ekonomske isplativosti optimalnih procesa obrade studiranih otpadnih voda provedena je ekonomska analiza prema izrazu (1), a na temelju postignutog stupnja uklonjenog sadržaja ukupnog organskog ugljika (Tablica 5). Pri tome su u obzir uzete cijene korištenih kemikalija (Tablica 4) i cijene električne energije utrošene u procesu miješanja ispitivanih otopina (HEP 2014). Rezultati izračuna prikazani su u Tablici 8.

Tablica 8. Ekonomska isplativost optimalnih procesa

PROCES	ISPLATIVOST, kN/% × 10 ⁻²
Koagulacija/flokulacija MV otpadne vode s FeCl ₃ ×6H ₂ O	5,91
Adsorpcija MV otpadne vode s aktivnim ugljenom	34,51
Koagulacija/flokulacija DPV otpadne vode s FeCl ₃ ×6H ₂ O	5,20
Adsorpcija DPV otpadne vode s aktivnim ugljenom	2,73
Koagulacija/flokulacija DPV otpadne vode s FeCl ₃ ×6H ₂ O uz adsorpciju na aktivnom ugljenu	7,91

Iz Tablice 8. je vidljivo da je za uklanjanje onečišćenja iz MV otpadne isplativiji proces koagulacije/flokulacije sa željezovim(III) kloridom od adsorpcije s obzirom na dobivenu nižu vrijednost omjera troška i postotka uklonjenog onečišćenja u iznosu od $5,91 \times 10^{-2}$ kn/%. Manja isplativost procesa adsorpcije s aktivnim ugljenom može se pripisati nižem stupnju uklanjanja ukupne organske tvari. Što se tiče uklanjanja onečišćenja iz DPV otpadne vode, ekonomska analiza provedena u okviru ovog rada pokazala je da je proces adsorpcije s aktivnim ugljenom gotovo dva puta isplativiji proces u odnosu na isplativost procesa koagulacije/flokulacije sa željezovim(III) kloridom s obzirom na dobivenu nižu vrijednost omjera troška i postotka uklonjenog onečišćenja u iznosu od $2,73 \times 10^{-2}$ kn/%. Manja isplativost procesa koagulacije/flokulacije sa željezovim(III) kloridom za pročišćavanje MV otpadne vode u odnosu na DPV otpadnu vodu može se pripisati manjem postignutom stupnju uklonjenog onečišćenja koje je u direktnoj vezi s otprilike 2,5 puta većim organskim opterećenjem sadržanim u MV otpadnoj vodi (Tablica 3).

Nadalje, ekonomska analiza je pokazala da je integralni proces koagulacije/flokulacije za obradu DPV otpadne vode manje isplativ od pojedinačnih procesa obrade, što je i logično jer zahtijeva upotrebu željezovog(III) klorida i aktivnog ugljena te veći utrošak električne energije potrebne za miješanje u procesu koagulacije/flokulacije i adsorpcije. Međutim, treba uzeti u obzir da u procesu koagulacije/flokulacije uz upotrebu metalnih soli nastaje znatna količina mulja (Aguilar *et al.* 2005; Verma *et al.* 2010; Ayoub *et al.* 2011). S obzirom da mulj predstavlja sekundarni otpad, čije neophodno zbrinjavanje u industrijskom mjerilu znatno poskupljuje proces obrade, opravdana je primjena integralnog pristupa u obradi industrijskih otpadnih voda jer upotrebom manje količine koagulant nastaje i manja količina mulja (Mehta & Chavan 2009) pa je za očekivati da bi u ovom slučaju ekonomska analiza pokazala veću isplativost integralnog procesa obrade u odnosu na samostalan proces obrade koagulacijom/flokulacijom.

5. ZAKLJUČAK

Za obradu industrijskih otpadnih voda iz procesa obrade mulja (MV) i čišćenja dimnih plinova (DPV) nastalih prilikom regeneracije plemenitih metala, ispitivana je mogućnost primjene koagulacije/flokulacije uz upotrebu aluminijevog(III) sulfata i željezovog(III) klorida, adsorpcije uz upotrebu aktivnog ugljena te integralnog pristupa koji je uključivao kombinaciju ovih dviju metoda. Aluminijev(III) sulfat se pokazao kao potpuno neučinkovit koagulant/flokulant za obradu ovog tipa industrijskih otpadnih voda. S druge strane, upotrebom $1,85 \text{ mmol/dm}^3$ željezovog(III) klorida za obradu MV otpadne vode, postignut je maksimalan stupanj uklanjanja zamućenja u iznosu od 57,3 % pri pH vrijednosti sustava 3,5. Pri ovim je uvjetima uklonjeno 8,4 % ukupnog organskog ugljika. Maksimalan stupanj uklanjanja zamućenja u iznosu od 97,4 % u DPV otpadnoj vodi postignut je upotrebom $0,37 \text{ mmol/dm}^3$ željezovog(III) klorida pri pH vrijednosti sustava 5. Pri

ovim je uvjetima uklonjeno 9,2 % ukupnog organskog ugljika. Optimalna koncentracija adsorbensa za uklanjanje onečišćenja iz MV otpadne vode iznosila je $0,1 \text{ g/dm}^3$ pri čemu je nakon 60 minuta uklonjeno gotovo 70 % zamućenja te 2,0 % ukupnog organskog ugljika. Primjenom $0,1 \text{ g/dm}^3$ aktivnog ugljena, za adsorpciju onečišćenja u DPV otpadnoj vodi nakon 30 minuta uklonjeno je 92,3 % zamućenja i 12,7 % ukupnog organskog ugljika. Kao optimalni parametri integralnog procesa obrade DPV otpadne vode odabrani su koncentracija željezovog(III) klorida u iznosu od $0,37 \text{ mmol/dm}^3$ i pH 5 pri čemu je uklonjeno 97 % zamućenja i 9,2 % ukupnog organskog ugljika, a u završnom stupnju obrade uz primjenu $0,1 \text{ g/dm}^3$ aktivnog ugljena i vrijeme miješanja u iznosu od 30 minuta, vrijednost zamućenja smanjena je za 91,3 %, a stupanj ukupne organske tvari za 12,8 %, u odnosu na početnu vrijednost DPV otpadne vode.

Dobiveni rezultati ukazuju da se uz parametre procesa koagulacije/flokulacije, adsorpcije te kombinirane upotrebe obiju metoda korištenih za pročišćavanje MV i DPV otpadne vode može postići zadovoljavajući stupanj obrade otpadne vode s obzirom na uklanjanje zamućenja. Što se tiče uklanjanja sadržaja ukupnog organskog ugljika, dobiveni rezultati ostavljaju prostora za daljnje istraživanje u smislu iznalaženja procesnih parametara uz koje će se dobiti veći stupanj uklanjanja ukupne organske tvari.

6. ZAHVALE

Zahvaljujemo djelatnicima Zavoda za hidrotehniku, Laboratorija za geokemiju okoliša na nesebičnom ustupanju laboratorijskog prostora, vremena i instrumenata te izvođenja analiza.

Posebno zahvaljujemo pokojnom doc.dr.sc. Predragu Tepešu, voditelju laboratorija u vrijeme izrade eksperimentalnog dijela ovog rada kojem i posvećujemo ovaj rad. Neka ti je vječna slava i hvala!

Zahvaljujemo Geotehničkom fakultetu na financijskom pokrivanju troškova analiza.

7. LITERATURA

- Amuda O S, Alde A (2006) Coagulation/flocculation process in the treatment of abattoir wastewater. *Desalination* 196:22-31
- Aguilar M I, Sáez, Lloréns, Soler A, Ortuño, Meseguer V, Fuentes A (2005) Improvement of coagulation-flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid. *Chemosphere* 58:47-56
- Appollo S, Onyango M S, Ochieng A (2013) An integrated anaerobic digestion and UV photocatalytic treatment of distillery wastewater. *J Hazard Mater* 261:435-442
- Argman Y A (1971) Pilot-Plant Studies of Flocculation. *J Am Water Works Assoc* 63:775-777
- Ayoub G M, Hamzeh A, Semerjian L (2011) Post treatment of tannery wastewater using lime/bittern coagulation and activated carbon adsorption. *Desalination* 273:359-365

De Gennes P G (1987) Polymers at an interface; a simplified view. *Adv Colloid Interface Sci* 27:189-209

Degremont G (1991) *Water Treatment Handbook*, Springer-Verlag, New York, SAD

Dialynas E, Diamadopoulos E (2008) Integration of immersed membrane ultrafiltration with coagulation and activated carbon adsorption for advanced treatment of municipal wastewater. *Desalination* 230:113-127

Faust S D, Aly O M (1999) *Chemistry of Water Treatment*. Lewis Publishers, Washington D.C., SAD

Garcia-Heras J L, Forster C F (1989) Treating bleaching effluent for suspended solids and color. *Tappi J* 72:199-206

Griffiths J D, Williams R G (1972) Application of Jar-Test Analysis at Phoenix AZ. *J Am Water Works Assoc* 64:825-830

HEP Operater distribucijskog sustava d.o.o. Tarifni modeli. Dostupno na: <http://www.hep.hr/ods/kupci/tarifni.aspx>. Citirano 05.04.2014.

HNB. Tečajna lista. Dostupno na: <http://www.hnb.hr/tecajn/htecajn.htm>. Citirano 05.04.2014.

Konsowa A H, Ossman M E, Chen Y, Crittenden J C (2010) Decolorization of industrial wastewater by ozonation followed by adsorption on activated carbon. *J Hazard Mater* 176:181-185

Lefebvre E, Legube B (1990) Iron(III) coagulation of humic substances extracted from surface waters: effect of pH and humic substances concentration. *Water Res* 24:591-606

Legrini O, Oliveros E, Braun A M (1993) Photochemical processes for water treatment. *Chem Rev* 93:671-698

Mehta V, Chavan A (2009) Physico-chemical Treatment of Tar-Containing Wastewater Generated from Biomass Gasification Plants. *WASET* 57:161-168

Meteš A, Kovačević D, Vujević D, Papić S (2004) The role of zeolites in wastewater treatment of printing inks. *Water Res* 38:3373-3381

Pravilnik o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju. *Narodne novine* 125/13.

Rubin E S, Davidson C I (2001) *Introduction to Engineering & the Environment*. McGraw-Hill International Edition, New York

Sigma-Aldrich. Katalog. Dostupno na: <http://www.sigma-aldrich.com/>. Citirano 05.04.2014.

Tušar B (2009) *Pročišćavanje otpadnih voda*. Kigen d.o.o., Zagreb

Verma S, Prasad B, Mishra I M (2010) Pretreatment of petrochemical wastewater by coagulation and flocculation and the sludge characteristics. *J Hazard Mater* 178:1055-1064

Woodard F (2001) *Methods for Treating Wastewaters from Industry*. Butterworth Heinemann, New Delhi

SASTAV ODLAGALIŠNOG PLINA NA ODLAGALIŠTU OTPADA PRUDINEC/JAKUŠEVEC

COMPOSITION OF LANDFILL GAS ON PRUDINEC/JAKUŠEVEC LANDFILL

Dinko Vujević¹, Maja Čalopek², Marija Novosel³, Aleksandra Anić Vučinić¹

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

² Preventa, Ured Čakovec, Bana Josipa Jelačića 5, HR-40000 Čakovec, HRVATSKA

³ Zagrebački holding d.o.o., Podružnica ZGOS, Zeleni trg 3, HR-10000 Zagreb, HRVATSKA

Sažetak: Nagli razvoj urbanizacije i industrijalizacije utjecao je na povećanje problema sakupljanja i odlaganja čvrstog otpada. Neadekvatno rješavanje tog problema može negativno utjecati na zdravlje ljudi i kvalitetu čovjekova okoliša. Na velikim odlagalištima komunalnog otpada stvaraju se znatne količine odlagališnog plina što može imati potencijalno velik utjecaj na kakvoću zraka posebno ako se otpad odlaže na neadekvatan način. U okviru ovog rada provedena je analiza sastava odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova na odlagalištu otpada Prudinec/Jakuševac u Zagrebu, za razdoblje od 2008. do 2011. godine. S obzirom na sanaciju smetlišta Prudinec/Jakuševac i njegovu transformaciju u uređeno odlagalište otpada I. kategorije, a sve u skladu s hrvatskim propisima i normama Europske unije, napravljen je veliki korak u zaštiti okoliša te otvorena mogućnost energetske iskorištavanja nastalog odlagališnog plina.

Cljučne riječi: komunalni čvrsti otpad, odlagališni plin, kakvoća zraka, odlagalište Prudinec/Jakuševac, zaštita okoliša.

Abstract: The rapid urban and industrial development has influenced the accumulation of problems in the sector of solid waste collecting and disposal. Non-efficient solving of this problem could negatively impact human health and quality of the environment. On the big municipal waste landfills the large amounts of landfill gas has been produced and can have potentially significant impact on air quality especially if the waste is disposed on non-adequate way. Within this work, the analysis of the landfill gas composition on the Prudinec/Jakuševac landfill in Zagreb, in the period from 2008. up to 2011. has been performed. Due to sanitation improvement of Prudinec/Jakuševac landfill and its transformation in arranged waste landfill of the I. category in accordance with Croatian law and European Union standards, a large step in environmental protection was made and the possibility of the use of formed landfill gas as a source of energy has founded.

Keywords: municipal solid waste, landfill gas, air quality, Prudinec/Jakuševac landfill, environmental protection.

Received: 30.01.2014 / Accepted: 13.05.2014

Stručni rad

1. UVOD

U području zaštite okoliša, kako u svijetu tako i u Hrvatskoj, nastanak otpada i postojeća odlagališta otpada jedan su od temeljnih problema s kojima se suočava moderno društvo. Naime, odlaganje otpada je još uvijek najčešći postupak zbrinjavanja otpada, u svijetu i Republici Hrvatskoj. Proizlazi da je odlaganje alternativa svim drugim postupcima zbrinjavanja otpada. Otpad nastaje kao posljedica svih ljudskih aktivnosti i u svim gospodarskim djelatnostima, a predstavlja gubitak energije i materijala. Emisija kemijskih spojeva i tvari koji nastaju razlaganjem otpada u zrak, vodu i tlo može negativno utjecati na zdravlje ljudi i okoliš. Stalni porast količina otpada rezultat je gospodarskog rasta i rastuće potrošnje materijala. Tehnike zbrinjavanja ostataka drastično zaostaju za tehnikama proizvodnje materijalnih dobara. U svijetu nema države koja je u potpunosti riješila probleme zbrinjavanja vlastitog otpada. Otpad koji se odlaže često je vrlo aktivan pa tako procesom raspadanja organskog dijela otpada nastaje odlagališni plin. Stoga je sustav otplinjavanja važan element kojeg mora imati svako uređeno odlagalište.

Na velikim odlagalištima komunalnog i sličnog proizvodnog otpada stvaraju se velike količine odlagališnog plina. Zbog sigurnosti, odlagališni plin mora se redovito skupljati, a s druge strane zbog ekonomičnosti i smanjenja negativnih utjecaja na okoliš ocjenjuje se racionalnim i opravdanim iskorištavati odlagališni plin.

U okviru ovog rada prikazani su rezultati analize sastava odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova na odlagalištu otpada Prudinec/Jakuševac u Zagrebu, za razdoblje od 2008. do 2011. godine. Obradom plinova koji nastaju na odlagalištu otpada te praćenjem njegovog sastava napravljen je veliki korak u zaštiti okoliša te otvorena mogućnost energetske iskorištavanja nastalog odlagališnog plina.

2. ODLAGALIŠTA OTPADA

Odlagalište otpada (deponija, smetlište) je građevina namijenjena za trajno odlaganje otpada, kao organizirane komunalne djelatnosti. U sklopu odlagališta otpada mogu

se nalaziti i građevine za skladištenje te obradu otpada. Odlagališta su grupirana prema kategorijama, odnosno pravnom statusu, veličini, vrstama odloženog otpada, stanju aktivnosti, utjecaju na okoliš i opremljenosti. Aktivna odlagališta mogu se razvrstati u pet kategorija na temelju pravnog statusa (tj. posjedovanje lokacijske, građevinske i uporabne dozvole). Odlagališta se tako dijele na: legalna uređena odlagališta, službena odlagališta otpada, odobrena odlagališta, dogovorna odlagališta i "divlja" odlagališta otpada. Tipičan izgled jednog uređenog odlagališta otpada prikazan je na slici 1., dok je na slici 2. prikazano "divlje" odlagalište otpada.



Slika 1. Uređeno odlagalište otpada,
http://hr.wikipedia.org/wiki/Odlagali%C5%A1te_otpad,
29.01.2014.



Slika 2. „Divlje“ odlagalište otpada,
http://hr.wikipedia.org/wiki/Odlagali%C5%A1te_otpad,
29.01.2014.

Odvoženje otpada na velika odlagališta još je uvijek najviše korišten način za postupanje s otpadom u Europi i svijetu. Međutim, mnoga od tih odlagališta otpada nisu opremljena prikladnim sustavima za sprječavanje emisija štetnih tvari u okoliš.

Odlagališta otpada su mjesta na kojima se otpad s vremenom potpuno neutralizira, razgradi i mineralizira te se pritom odvijaju više ili manje intenzivni kemijski, fizikalni i biološki procesi razgradnje. Pritom se oslobađa vodena para, različiti plinovi i toplina. Brzina i intenzitet

tih procesa ovisi o sastavu otpada, sadržaju vlage, udjelu i vrsti organskih tvari, meteorološkim uvjetima, načinu odlaganja otpada, gradnji odlagališta itd.

Danas se velika prednost daje modelu sanitarnog deponija uz sve veću primjenu reciklaže, tj. odvajanja korisnog otpada i to na mjestima njegovog nastanka, a koji se tada koristi kao sekundarna sirovina. Pravilno projektirana i izgrađena odlagališta otpada predstavljaju objekte koji daju najveću sigurnost glede negativnog utjecaja na okoliš, ali uz uvjet da su provedene sve mjere vezane uz planiranje, realizaciju, eksploataciju i uređenje. Osnovni problemi odlagališta otpada su procjedne vode i stvaranje odlagališnog plina.

U cilju smanjivanja opasnosti odlaganja otpada, prije tridesetak godina započeo je razvoj i primjena niza sofisticiranih tehnika odlaganja otpada. Danas suvremena uređena/sanitarna odlagališta otpada koriste čitav niz elektronske i druge opreme. Pokazalo se da se novim tehničkim rješenjima smanjuje, ali nikako ne i posve otklanja rizik od odlaganja neobrađenog komunalnog i sličnog proizvodnog otpada.

Sve veći tehnički zahtjevi za izvedbu odlagališta, da bi ono bilo što sigurnije za okoliš, stalno povećavaju troškove odlaganja otpada, a sve veće količine i sve niža nasipna gustoća otpada zahtijevaju sve veće površine zemljišta za odlaganje neobrađenog otpada.

Izgradnjom novih uređenih odlagališta te sanacijom postojećih odlagališta smanjuje se rizik od pojave požara i eksplozija na odlagalištima, stvara se mogućnost za ostvarivanje nove vrijednosti (eksploatacija odlagališnog plina) te smanjuje negativni utjecaj na okoliš. Stoga uređeno odlagalište otpada pretpostavlja i nadzirano prikupljanje te obradu odlagališnog plina, jer se na taj način omogućava zaštita ozonkog sloja, izbjegavanje efekta staklenika te proizvodnja električne i toplinske energije iz prikupljenog odlagališnog plina.

2.1. Odlagalište otpada Prudinec/Jakuševac

Odlagalište otpada Prudinec/Jakuševac služi kao odlagalište komunalnog, neopasnog i industrijskog otpada grada Zagreba i njegove okolice. Udaljeno je 5 km zračne linije od središta Zagreba, a nalazi se na desnoj obali rijeke Save, na udaljenosti 400 m od prvih stambenih objekata naselja Jakuševac, po kojem je dobilo ime. Smjer pružanja odlagališta je sjeverozapad-jugoistok, duž nasipa rijeke Save od kojega je odvojeno lokalnom cestom. Odlagalište otpada Prudinec/Jakuševac prostire se na oko 90 ha, a dnevno se odlaže oko 1000 t otpada (slika 3.) (Barčić 2010).

Na području današnjeg odlagališta otpada nekontrolirano odlaganje otpada započelo je 1965. godine, a 1995. godine prostor odlagališta zauzima 80 ha. Tako je u tom razdoblju na neprimjeren način odloženo 4,5 milijuna m³ otpada, a do 2000. godine volumen odloženog otpada iznosio je 8 milijuna m³. Zbog zanemarivanja problema odlagališta, postalo je najveće neuređeno odlagalište otpada u jugoistočnom dijelu Europe (Barčić 2010).



Slika 3. Odlagalište otpada Prudinec/Jakuševac,
<http://www.zgos.hr/>, 29.01.2014.

Godine 1995. pristupilo se sanaciji odlagališta. Glavni dio sanacije neuređene deponije otpada u uređeno sanitarno odlagalište odvijao se u razdoblju od 1996. do 2003. godine (slika 4. i 5.) Potpuni završetak svih planiranih radova sanacije trebao je biti dovršen do kraja 2011. godine. U tom razdoblju je vrlo skupim zahvatom pod nagomilani otpad ugrađena nepropusna podloga, čime je površina smanjena s 80 na 57 ha, a brdo je naraslo do visine od 45 metara. Za održavanje odlagališta otpada Prudinec/Jakuševac zadužen je Zagrebački holding – podružnica ZGOS d.o.o.



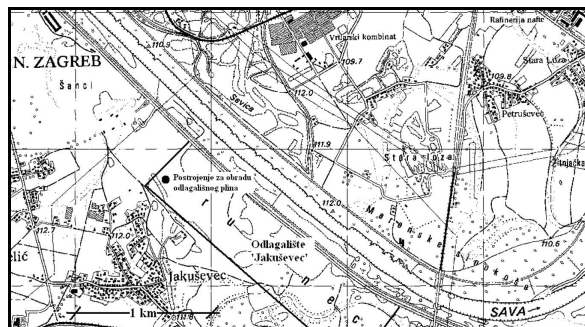
Slika 4. Odlagalište prije završetka sanacije, 2000. godina (Barčić 2010)



Slika 5. Radovi na sanaciji odlagališta (Barčić 2010)

Područje odlagališta danas je organizirano na sljedeći način: ulaz na odlagalište, plato za međuodlaganje (privremeno skladištenje), reciklaža građevnog otpada, gospodarenje plinom, tijelo odlagališta s platom za dnevno odlaganje, pročišćavanje procjednih voda, biokompostana, automatski uređaj za pranje kotača te monitoring.

Postrojenje za obradu odlagališnih plinova smješteno je na sjeveroistočnom dijelu odlagališta otpada Jakuševac (slika 6.), uz postrojenje za obradu građevinskog otpada. Udaljeno je oko 300 metara jugoistočno od ulaza na odlagalište.



Slika 6. Lokacija postrojenja za obradu odlagališnog plina

2.2. Odlagališni plin

Odlagališni plin nastaje na svakom odlagalištu neobrađenog komunalnog otpada. U odlagališta komunalnog otpada ulazi nepoznat i promjenjiv kemijski sastav različitih tvari. Zbog toga u tijelu odlagališta dolazi do nedovoljno poznatih biokemijskih procesa i razgradnje organske mase. Kako su ti procesi vrlo složeni, oni ovise o nizu čimbenika kao što su: vrsta i količina odloženog materijala, količina zraka/kisika u tijelu odlagališta, količina vode u tijelu odlagališta, atmosferski uvjeti (temperatura i tlak zraka, sadržaj vlage u zraku, smjer i brzina vjetra), način i vođenje otplinjavanja, tehnika odlaganja otpada, vrijeme odlaganja i sl.

Na svakom odlagalištu neobrađenog komunalnog otpada koje se može opisati kao složeni bioreaktor, uz emisije odlagališnog plina generira se i određena količina visoko opterećenih procjednih voda. Sve biološke aktivnosti ovise o sadržaju biološki razgradivih organskih tvari u odloženom otpadu. Isušivanjem tijela odlagališta dolazi do procesa mumifikacije, tj. zastoja bioloških procesa (npr. kod izgradnje gornjeg brtvenog sloja). Tek kada voda ponovno uđe u tijelo odlagališta ponovno se pokrenu bioreakcije i emisije odlagališnog plina, kao i procjednih voda.

Odlagališni plin nastaje kroz tri procesa, ukratko opisanih u nastavku.

I. Bakterijska dekompozicija:

Većina odlagališnog plina proizvodi se bakterijskom dekompozicijom, koja se javlja kada se organski otpad razgradi bakterijama koje su prirodno prisutne na odlagalištu i tlu koje se koristi za zatrpavanje otpada. Organski otpad uključuje hranu, vrtni otpad, ostatke od čišćenja ulica, tekstil te drvo i papirni otpad. Bakterije

razgrađuju organski otpad u četiri faze, a sastav plinova mijenja se kroz svaku fazu

II. Hlapljenje:

Odlagališni plinovi mogu nastati kada se određeni otpad, prvenstveno organskog sastava, mijenja iz tekućeg ili čvrstog stanja u paru. Ovaj proces poznat je kao hlapljenje. Postojanje NMOC (engl. Non-Methan Organic Compounds ili ne-metanski organski spojevi) na odlagalištu može rezultirati hlapljenjem određenih kemikalija koje nastaju na odlagalištu.

III. Kemijske reakcije:

Otpadni plinovi, uključujući i NMOC, mogu se proizvesti reakcijama određenih kemikalija koje su prisutne na odlagalištu.

Najvažniji biološki procesi u tijelu odlagališta komunalnog otpada odvijaju se u četiri glavne faze, ukratko opisane u nastavku.

Prva faza: uključuje aerobno biološko stvaranje viših molekula ostatnih tvari. Ako u tijelo odlagališta prodire ili ulazi zrak, ta faza se može produljiti. Kako je zrak zarobljen u odloženom otpadu, nakon odlaganja sadržaj kisika i dušika u plinu je visok. No, već nakon 2-3 tjedna prekrivanja sadržaj kisika smanjuje se s 20 % na 0 %. Sadržaj dušika se također smanjuje i to kroz prvih 8 tjedana s 80 % na 40 %, a kroz dvije godine i do 0 %.

Druga faza ili kiselo truljenje: započinje kada u tijelu odlagališta nestaje kisika te time ugibaju aerobni mikroorganizmi i počinju se razvijati anaerobni mikroorganizmi. Dolazi do nestabilne anaerobne biološke faze u kojoj nastaju kiseline. Najčešće su to nisko masne kiseline. Vrijednost pH pada na 5,5. U ovoj fazi još nema stvaranja metana, ali valja spomenuti kako sadržaj CO₂ može porasti do 80 %. Kemijska reakcija razgradnje organske tvari u anaerobnim uvjetima može se prikazati:



Treća faza ili stabilna metanogena faza: ponekad započinje već 4-6 mjeseci nakon odlaganja. Povećava se proizvodnja metana, jer su metanogeni mikroorganizmi vrlo aktivni. Proizvedeni bioplin sadrži 50-70 % metana, odnosno 30-50 % CO₂. Vrijednost pH se povećava na 7 do 8,5. Nakon šest godina dolazi do smanjenja proizvodnje metana za 50 %, a nakon toga smanjenje je sve brže.

Četvrta ili završna metanogena odumiruća faza: koja je okarakterizirana smanjenjem proizvodnje plina, a time i smanjenjem pretlaka u tijelu odlagališta. U toj fazi ugibaju anaerobni mikroorganizmi i ubrzano se smanjuje proizvodnja odlagališnog plina (Milanović & Novosel 2011).

Prethodno teoretski opisani biološki procesi izravno su povezani s proizvodnjom odlagališnog plina. No, često se događa da u praksi dolazi do većih odstupanja. Valja napomenuti da su za sve biološke procese ključni faktori upravo voda i zrak.

Načelno kroz nekih 15-25 godina iz 1 tone odloženog komunalnog otpada nastaje 100-200 m³ odlagališnog plina. Tipičan sastav odlagališnog plina prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Tipičan sastav odlagališnog plina [13]

TVAR	VOLUMNI UDIO, %
Metan	45 – 60
Ugljični dioksid	40 – 60
Dušik	2 – 5
Kisik	0,1 – 1
Amonijak	0,1 – 1
NMOC	0,01 – 0,6
Sulfidi	0 – 1
Vodik	0 – 0,2
Ugljični monoksid	0 – 0,2

Kao što je iz tablice 1. vidljivo, odlagališni plinovi sastoje se od mješavine različitih plinova. Prema volumnom udjelu, plinovi idealno sadrže 40 % do 60 % metana i 40 % do 60 % ugljičnog dioksida. Odlagališni plinovi također sadrže male količine dušika, kisika, amonijaka, sulfida, vodika, ugljičnog monoksida i nemetanskih organskih spojeva (NMOC) kao što su trikloreten, benzen i vinil klorid.

Glavne komponente odlagališnog plina metan (CH₄) i ugljikov dioksid (CO₂), plinovi su bez boje i mirisa. Gledajući s aspekta utjecaja na atmosferu oba spadaju u skupinu stakleničkih plinova te pridonose globalnim klimatskim promjenama tj. globalnom zatopljenju.

NMOC čine organski spojevi (oni koji sadrže ugljik), isključujući metan, a mogu se pojaviti u prirodi ili proizvesti sintetskim kemijskim procesima. NMOC koji se najčešće nalaze na odlagalištima uključuju: akrilonitril, 1,2,-dikloreten, 1,2,-cis dikloretilen, diklormetan, ugljični sulfid, etil-benzen, heksan, metil-etil-keton, tetrakloretilen, toluen, trikloretilen, vinil-klorid i ksilene.

Sulfidi (npr. sumporovodik, dimetil sulfid, merkaptani) plinovi su koji se prirodno pojavljuju i odlagalištu daju neugodan miris pokvarenih jaja. Time utječu na kakvoću zraka u užem području odlagališta otpada. Uz to, sulfidi mogu uzrokovati neugodne mirise čak i ako su prisutni u vrlo malenim koncentracijama.

Kako u odlagališnom plinu ima najviše metana, on se može i energetske iskoristiti, ali taj povišeni sadržaj metana predstavlja i potencijalnu opasnost od eksplozija na odlagalištima. Zbog toga na uređenom (sanitarnom) odlagalištu odlagališni plin treba sakupljati te odvoditi do plinskog postrojenja za isisavanje i obradu. Zato se plinsko postrojenje često sastoji i od opreme za iskorištavanje odlagališnog plina.

Gospodarenje otpadom te aktivnosti na odlagalištima otpada regulirana su Zakonom o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/13), Pravilnikom o gospodarenju otpadom (NN 23/14) i Pravilnikom o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 117/07, 111/11, 17/13, 62/13). U okviru kontrole, a sukladno članku 19. Pravilnika o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 117/07), osoba

koja upravlja odlagalištima opasnog i neopasnog otpada mora osigurati mjerenja emisija odlagališnog plina.

Mjerenja koncentracije odlagališnih plinova u zrak obuhvaćaju mjesečna mjerenja koncentracije CH₄, CO₂ i O₂ u odlagališnom plinu za vrijeme rada odlagališta, a nakon zatvaranja svakih 6 mjeseci. Mjerenje ostalih odlagališnih plinova (H₂S i H₂) provodi se ovisno o sastavu odloženog otpada ili ako je to propisano u dozvoli za obavljanje djelatnosti odlaganja otpada. Ta se mjerenja moraju provesti na reprezentativnom broju uzoraka, a učinkovitost sustava za skupljanje odlagališnog plina mora se redovito provjeravati. Ukoliko se rezultati mjerenja sastava i koncentracije odlagališnog plina ponavljaju, vrijeme između dvaju uzastopnih mjerenja može se produžiti, ali ne smije biti duže od šest mjeseci.

2.3. Sustav otplinjavanja

Zbog izbjegavanja štetnih emisija i energetskog iskorištavanja plina, uređeno odlagalište otpada pretpostavlja i nadzirano prikupljanje te obradu odlagališnog plina. Na taj se način omogućava zaštita ozonskog sloja, izbjegavanje efekta staklenika te proizvodnja električne i toplinske energije iz prikupljenog odlagališnog plina.

Nakon što su prepoznati svi negativni utjecaji odlagališnih plinova, u Europi se početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća započelo s prikupljanjem i izgaranjem odlagališnih plinova na plinskim bunarima i plinskim stanicama. Tehnologija plinskih stanica godinama se razvijala, a obrada je odlagališnih plinova izgaranjem postala općeprihvaćena. Razvitku tehnologije prilagođavali su se zakonodavstvo i prateći propisi te je tako usvojen niz normi i smjernica (Samokovlija Dragičević 2011).

Dana 26. travnja 1999. godine donesena je Europska direktiva o odlaganju otpada (1999/31/EC) u kojoj je u aneksu 1., članka 4., izričito navedeno: "Ako se prikupljeni plin ne može iskoristiti za proizvodnju energije, mora se spaliti." Hrvatska je 1997. godine donijela Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 117/07) u kojem je u općim uvjetima, pod točkom 4. propisano da ukoliko na odlagalištu nastaje odlagališni plin, potrebno je osigurati sustav za njegovo sakupljanje, obradu i korištenje. Ukoliko se sakupljeni odlagališni plinovi ne mogu upotrijebiti za dobivanje energije, treba ih spaliti na području odlagališta ili spriječiti njihovu emisiju u zrak.

Prema pronađenim podacima od ukupno 149 nadziranih odlagališta samo pet ima izveden sustav za prikupljanje i obradu odlagališnih plinova. Što bi značilo da je od ukupno 1,2 milijuna tona komunalnog otpada koji se na godinu proizvede u Hrvatskoj, otplinjavanjem obuhvaćeno približno 330.000 t/godišnje (od toga čak 90% na odlagalištu Jakuševac u Zagrebu). Od preostalih 870.000 t/godišnje otpada, 35% obuhvaća biorazgradive tvari koje aktivno sudjeluju u proizvodnji odlagališnih plinova. Takvi odlagališni plinovi će se prije ili poslije osloboditi iz tijela odlagališta i imati negativan utjecaj na

bliži i dalju okolicu odlagališta (Samokovlija Dragičević 2011).

Prema Europskoj direktivi o odlaganju otpada (1999/31/EC, 1882/2003, 1137/2008) smatra se da je potrebno otplinjavati svako odlagalište komunalnog otpada s više od 10.000 m³ otpada na godinu. Od jedne tone otpada može za 15-20 godina postojanja odlagališta nastati 150-300 m³ plina. U prosjeku se računa s 10-25 m³ plina po toni otpada na godinu (Samokovlija Dragičević 2010).

Za otplinjavanje se koriste dva sustava, a to su pasivni i aktivni. Pasivni sustavi su pogodni za mala odlagališta (do 40.000 m³) i tamo gdje se ne očekuje znatno širenje plinova. Kod pasivnih sustava u tijelu odlagališta izvode se drenirani plinski zdenci pomoću kojih plin lakše odlazi u atmosferu. Tako se smanjuje pretlak u tijelu odlagališta, a odlagališni plin migrira u okoliš na mjestima plinskih zdenaca.

Aktivni su sustavi za veće količine i opasne vrste plinova koje treba spaliti. Kod aktivnih sustava uz plinske zdence izvode se plinovodi koji su spojeni s plinskim postrojenjem. U plinskom postrojenju puhalo iz plinovoda plinskih zdenaca odsisava plin te se on obrađuje na visokotemperaturnoj plinskoj baklji ili iskorištava za proizvodnju električne energije, ali su za to potrebni još i dodatni uređaji i instalacije. Ni aktivnim sustavom otplinjavanja nije moguće u potpunosti spriječiti neke neočekivane migracije plina u okoliš (Samokovlija Dragičević 2010).

Kada se ne provodi otplinjavanje (prirodni uvjeti), u tijelu odlagališta stvara se pretlak (3 mbar i više). Tada odlagališni plin postupno migrira u okoliš. Takve nekontrolirane migracije smanjuju se sustavom pasivnog otplinjavanja.

Sustav otplinjavanja odlagališta otpada Prudinec sastoji se od sustava za otplinjavanje iz tijela odlagališta (68 plinskih zdenaca + mreža plinovoda s kondenznim loncima) plinskog postrojenja, dvije visokotemperaturne baklje s puhalima kapaciteta 1.500 m³/h, dva plinska motora s generatorima kapaciteta 525 m³/h/motoru i ukupne električne snage svakog generatora 1 MW. Plinsko postrojenje na odlagalištu otpada Prudinec/Jakuševac prikazano je na slici 7.



Slika 7. Sustav otplinjavanja i plinsko postrojenje (MTEO JAKUŠEVAC), <http://www.zgos.hr/>, 29.01.2014.

3. METODOLOGIJA

Analiza sastava odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova provedena je od strane poduzeća ECOINA d.o.o. u okviru projekta „Monitoring sanitarnog odlagališta Jakuševac“. Svi poslovi vezani uz mjerenja sastava odlagališnog plina su izvedeni temeljem pismenog zahtjeva, a na teret podnositelja zahtjeva/naručitelja: „ZAGREBAČKI HOLDING“ d.o.o u svrhu posebnih indikativnih mjerenja sastava uzoraka odlagališnog plina na ulaznom cjevovodu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova (MTEO) na odlagalištu otpada Prudinec/Jakuševac. Praćenje sastava odlagališnog plina obavlja se kontinuirano, a u ovom radu prikazani su rezultati mjerenja za razdoblje od 2008. godine do 2011. godine.

Prema ugovoru, predviđeno mjesto uzorkovanja je cjevovod na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnog plina. U ovom cjevovodu odlagališni plin ima podtlak koji iznosi – 25 mbar (0,025 bar). Osim na ovoj lokaciji za provjeru je uzet dodatni uzorak plina iz tlačnog cjevovoda neposredno prije obrade u postrojenju. Plin u tlačnom cjevovodu je nadtlačen na + 95 mbar (1,095 bar).

Prilikom uzorkovanja uzimana su dva uzorka. Prvi uzorak u tlačnom cjevovodu (UZORAK 1), a drugi na ulazu u postrojenje (UZORAK 2) pri tlakovima koji su varirali od 19,59 mbar do 158,13 mbar (UZORAK 1) i od 25,70 mbar do 158,63 mbar (UZORAK 2).

Pokazatelji o sastavu odlagališnog plina koji su u okviru mjerenja praćeni uključivali su metan (CH₄), ugljični dioksid (CO₂), kisik (O₂), vodik (H₂), sumporovodik (H₂S) te tlak i temperaturu zraka.

3.1. Korištena mjerna oprema i instrumentarij

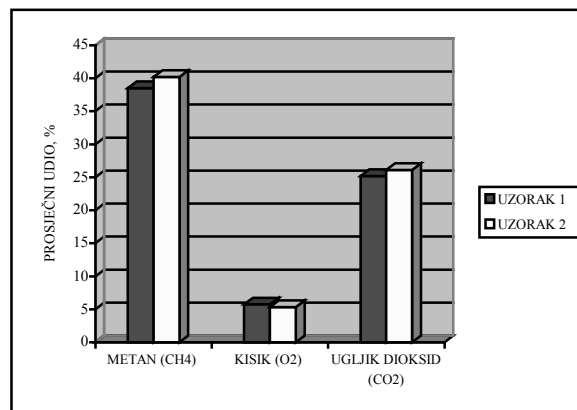
Sva mjerenja provedena su uređajem GA2000Plus Gas Analyser, čiji je proizvođač Geotechnical Instruments iz Velike Britanije.

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Analiza odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za 2008. godinu

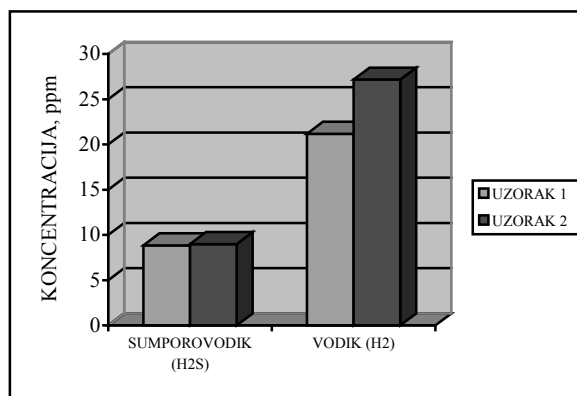
U okviru analize sastava odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za 2008. godinu mjereni pokazatelji uključivali su metan (CH₄), ugljični dioksid (CO₂), kisik (O₂), vodik (H₂) i sumporovodik (H₂S). Rezultati analize prikazani su slikom 8. i 9.

Iz slike 8. koja prikazuje prosječne udjele metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2008. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako udio metana u UZORKU 1 iznosi 38,53 %, kisika 5,74 %, a ugljik dioksida 25,21 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da je udio metana 40,20 %, kisika 5,31 %, a ugljik dioksida 26,13 %.



Slika 8. Prosječni udjeli metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2008. god.

Dobivene vrijednosti su nešto ispod vrijednosti tipičnog sastava odlagališnog plina, što je vidljivo ako se usporede s vrijednostima prikazanim u tablici 1. Vrijednosti za metan su za oko 5 % ispod vrijednosti koja odgovara tipičnom sastavu odlagališnog plina. Isto je i sa ugljik dioksidom, čije su vrijednosti za oko 14 % ispod propisanih vrijednosti, dok su vrijednosti za kisik oko 5 % iznad propisanih vrijednosti.



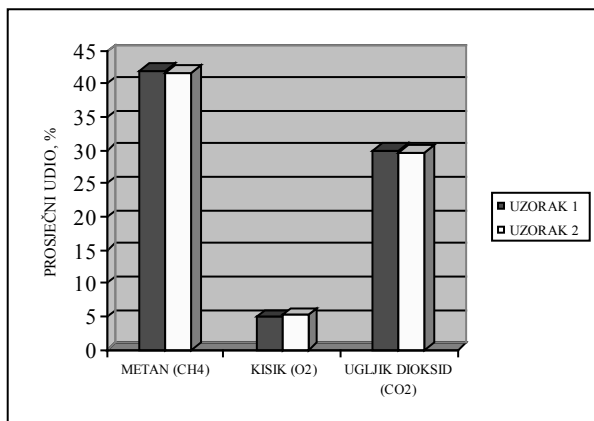
Slika 9. Prosječne koncentracije sumporovodika i vodika, u ppm tijekom 2008. god.

Iz slike 9. koja prikazuje prosječne koncentracije sumporovodika i vodika u ppm tijekom 2008. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako koncentracija sumporovodika u UZORKU 1 iznosi 8,86 ppm ili 0,0009 %, a vodika 21,17 ppm ili 0,0021 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da koncentracija sumporovodika iznosi 9,0 ppm ili 0,0009 %, a vodika 27,17 ppm ili 0,0027 %.

Mjereni odlagališni plin tijekom 2008. god. u postrojenju za obradu nema očekivani sastav posebice glede udjela ugljičnog dioksida, metana i kisika, a razlog tome je što se 1995. godine pristupilo sanaciji odlagališta otpada Prudinec/Jakuševac koja je trebala u potpunosti biti dovršena do kraja 2011. godine. Kako su ovdje prikazani rezultati za 2008. godinu, očito je kako potpuna stabilizacija još nije postignuta te rezultati odstupaju od propisanih vrijednosti. Udjeli ostalih komponenti odlagališnog plina koji su manje zastupljeni ili su zastupljeni u tragovima u granicama su očekivanog.

4.2. Analiza odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za 2009. godinu

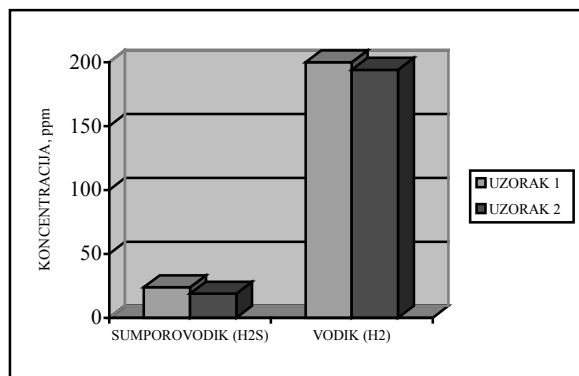
U okviru analize sastava odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za 2009. godinu mjereni pokazatelji također su uključivali metan (CH_4), ugljični dioksid (CO_2), kisik (O_2), vodik (H_2) i sumporovodik (H_2S). Rezultati analize prikazani su slikom 10. i 11.



Slika 10. Prosječni udjeli metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2009. god.

Iz slike 10. koja prikazuje prosječne udjele metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2009. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja također vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako udio metana u UZORKU 1 iznosi 42,03 %, kisika 4,85 %, a ugljik dioksida 30,07 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da je udio metana 41,70 %, kisika 5,18 %, a ugljik dioksida 29,74 %.

Dobivene vrijednosti još su uvijek nešto ispod vrijednosti tipičnog sastava odlagališnog plina, što je vidljivo ako se usporede izmjerene vrijednosti s podacima prikazanim u tablici 1. Međutim, ipak se primjećuje trend približavanja vrijednostima koje odgovaraju tipičnom sastavu odlagališnog plina, osobito glede sadržaja metana i ugljik dioksida. Vrijednosti za metan još uvijek su oko 3 % ispod vrijednosti koja odgovara tipičnom sastavu odlagališnog plina. Vrijednosti ugljik dioksida su za oko 10 % ispod propisanih vrijednosti, a kisika oko 5 % iznad propisanih vrijednosti.



Slika 11. Prosječne koncentracije sumporovodika i vodika, u ppm tijekom 2009. god.

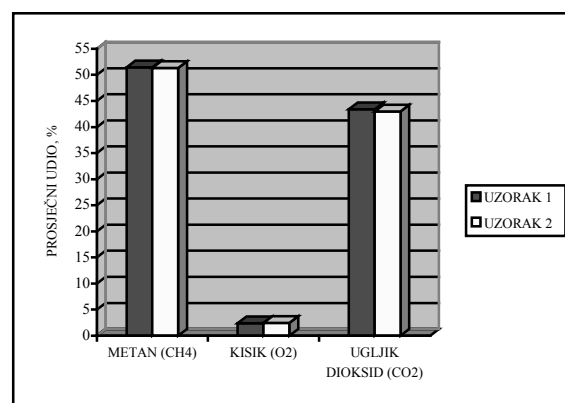
Iz slike 11. koja prikazuje prosječne koncentracije sumporovodika i vodika u ppm tijekom 2009. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako koncentracija sumporovodika u UZORKU 1 iznosi 23,92 ppm ili 0,0024 %, a vodika 119,83 ppm ili 0,02 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da koncentracija sumporovodika iznosi 18,92 ppm ili 0,0019 %, a vodika 194,0 ppm ili 0,019 %.

Mjereni odlagališni plin tijekom 2009. god. u postrojenju za obradu nema očekivani sastav posebice glede udjela ugljičnog dioksida, kisika i metana, a razlog tome je što sanacijski radovi na odlagalištu još uvijek nisu u potpunosti bili dovršeni. Udjeli ostalih komponenti odlagališnog plina koji su manje zastupljeni ili su zastupljeni u tragovima također su u granicama očekivanog.

4.3. Analiza odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za 2010. godinu

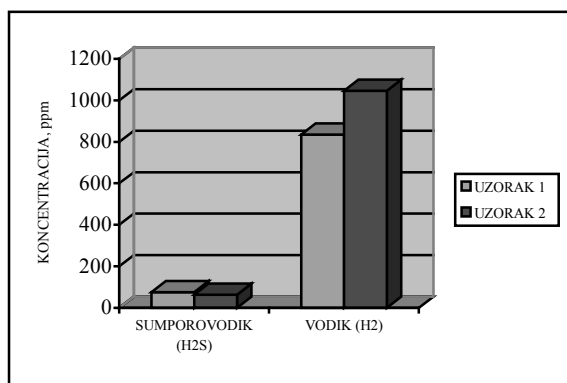
U okviru analize sastava odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za 2010. godinu mjereni pokazatelji uključivali su metan (CH_4), ugljični dioksid (CO_2), kisik (O_2), vodik (H_2) i sumporovodik (H_2S). Rezultati analize prikazani su slikom 12. i 13.

Iz slike 12. koja prikazuje prosječne udjele metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2010. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja također vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako udio metana u UZORKU 1 iznosi 51,46 %, kisika 2,40 %, a ugljik dioksida 43,40 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da je udio metana 51,30 %, kisika 2,46 %, a ugljik dioksida 42,97 %.



Slika 12. Prosječni udjeli metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2010. god.

Iz slike 12. koja prikazuje prosječne udjele metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2010. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja također vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako udio metana u UZORKU 1 iznosi 51,46 %, kisika 2,40 %, a ugljik dioksida 43,40 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da je udio metana 51,30 %, kisika 2,46 %, a ugljik dioksida 42,97 %.



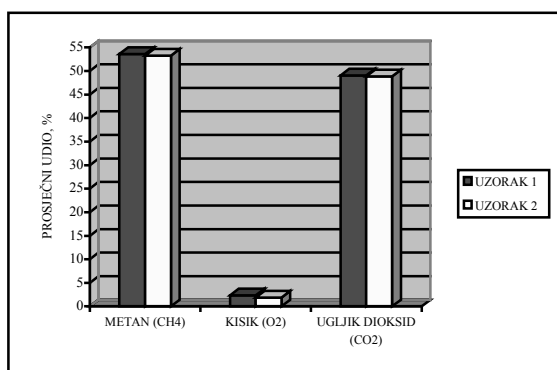
Slika 13. Prosječne koncentracije sumporovodika i vodika, u ppm tijekom 2010. god.

Iz slike 13. koja prikazuje prosječne koncentracije sumporovodika i vodika u ppm tijekom 2010. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako koncentracija sumporovodika u UZORKU 1 iznosi 75,43 ppm ili 0,0075 %, a vodika 834,5 ppm ili 0,083 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da koncentracija sumporovodika iznosi 63,14 ppm ili 0,0063 %, a vodika 1046,5 ppm ili 0,1 %.

Mjereni odlagališni plin tijekom 2010. god. u postrojenju za obradu ima očekivani sastav posebice glede udjela ugljičnog dioksida i metana. Udjel kisika u ulaznom dijelu postrojenja je nešto povećan (za oko 1,5 %), što je razumljivo obzirom na tehnologiju prikupljanja i obrade odlagališnog plina. Također i udjeli ostalih komponenti odlagališnog plina koji su manje zastupljeni ili su zastupljeni u tragovima u granicama su očekivanog. Navedeno ukazuje da su u tijelu odlagališta postignuti uvjeti za odvijanje stabilne mikrobiološke razgradnje organske faze.

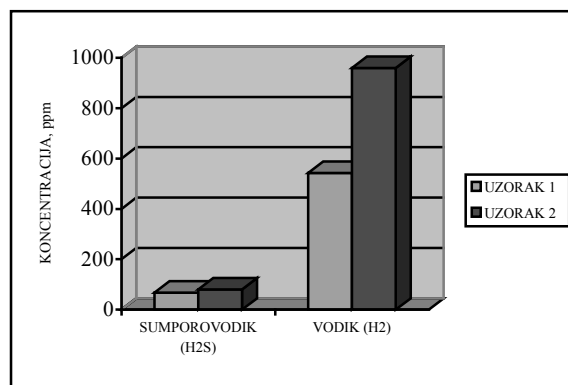
4.4. Analiza odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za 2011. godinu

U okviru analize sastava odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za 2011. godinu mjereni pokazatelji uključivali su metan (CH₄), ugljični dioksid (CO₂), kisik (O₂), vodik (H₂) i sumporovodik (H₂S). Rezultati analize prikazani su slikom 14. i 15.



Slika 14. Prosječni udjeli metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2011. god.

Iz slike 14. koja prikazuje prosječne udjele metana, kisika i ugljik dioksida u % tijekom 2011. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja također vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako udio metana u UZORKU 1 iznosi 53,61 %, kisika 2,37 %, a ugljik dioksida 49,07 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da je udio metana 53,29 %, kisika 1,87 %, a ugljik dioksida 48,87%.



Slika 15. Prosječne koncentracije sumporovodika i vodika, u ppm tijekom 2011. god.

Iz slike 15. koja prikazuje prosječne koncentracije sumporovodika i vodika u ppm tijekom 2011. godine vidljivo je da su udjeli praćenih pokazatelja vrlo slični za UZORAK 1 i UZORAK 2. Tako koncentracija sumporovodika u UZORKU 1 iznosi 68,0 ppm ili 0,0068 %, a vodika 543,29 ppm ili 0,054 %. Izmjerene vrijednosti za UZORAK 2 pokazuju da koncentracija sumporovodika iznosi 80,71 ppm ili 0,0080 %, a vodika 966,43 ppm ili 0,096 %.

Mjereni odlagališni plin tijekom 2011. god. u postrojenju za obradu ima očekivani sastav posebice glede udjela ugljičnog dioksida i metana. Također i udjeli ostalih komponenti odlagališnog plina koji su manje zastupljeni ili su zastupljeni u tragovima u granicama su očekivanog.

5. ZAKLJUČAK

Metan i ugljikov dioksid najzastupljeniji su spojevi u sastavu odlagališnog plina, a nastali su raspadom organske frakcije komunalnog otpada. Metan je u odnosu na CO₂ bitno štetniji staklenički plin, a u koncentracijama većim od 4,4 vol.% i manjim od 16,5 vol.% je eksplozivan.

U okviru ovog rada provedena je analiza sastava odlagališnog plina na ulazu u postrojenje za obradu odlagališnih plinova za razdoblje od 2008. godine do 2011. godine. Stupanj povećanja ili smanjenja koncentracija kreće se ovisno o udjelu biološke komponente preostale u otpadu nakon obrade i prisutnim meteo - uvjetima. Tako isušivanjem tijela odlagališta dolazi do mumifikacije, tj. zastoja bioloških procesa. Međutim, čim voda ponovno dođe u tijelo odlagališta ponovno dolazi do oživljavanja bioreakcija. Važnu ulogu ima i sanacija odlagališta kojoj se na odlagalištu otpada Prudinec/Jakuševac pristupilo 1995. godine. Poznato je kako odlagališta otpada funkcioniraju kao golemi

kemijski i biološki reaktori, pa je zato za potpunu stabilizaciju potrebno dugo vremensko razdoblje. Tako se i na odlagalištu otpada Prudinec/Jakuševac koncentracije metana i ostalih praćenih komponenata odlagališnog plina iz godine u godinu sve više približavaju vrijednostima koje odgovaraju tipičnom sastavu odlagališnog plina.

Za 2008. godinu su smanjene vrijednosti metana i ugljik dioksida, a povećane vrijednosti kisika s obzirom na propisane vrijednosti. Ista je situacija i u 2009. godini. Kroz 2010. godinu i 2011. godinu mjereni pokazatelji su u granicama dozvoljenih vrijednosti, osim kisika čije su koncentracije u 2010. godini još uvijek malo iznad propisanih vrijednosti. Udjeli ostalih komponenti odlagališnog plina, tj. sumporovodika i vodika, koji su manje zastupljeni, u granicama su očekivanog za čitavo mjereno razdoblje.

6. ZAHVALE

Autori iskazuju posebnu zahvalnost tvrtki Zagrebački holding, podružnici ZGOS d.o.o. na ustupanju podataka korištenih za izradu ovog rada.

7. LITERATURA

Barčić D (2010) Utjecaj odlagališta otpada Prudinec/Jakuševac na onečišćenje okoliša. Sumar list 134:347-358

Direktiva o odlagalištima. Dostupno na www.mzoip.hr/doc/IPPC/Odlagalista.pdf. Datum pristupa 25.03.2014.

Milanović Z, Novosel M (2011) Odlagališni plin i druge opasnosti na odlagalištu otpada. Udruga gospodarenje otpadom, Zagreb

Samokovlija Dragičević J (2010) Uvjeti za gradnju odlagališta otpada. Građevinar 62:345-351

Samokovlija Dragičević J (2011) Otplinjavanje odlagališta kmunalnog otpada. Građevinar 63:211-215

BRUNNEN

ITSJINA

PROCJENA KRUTOSTI TLA IN-SITU ISPITIVANJIMA I KORELACIJE IZMEĐU v_s , N_{SPT} I N_{10H}

SOIL STIFFNESS EVALUATION BASED ON IN-SITU TESTS AND CORRELATIONS BETWEEN v_s , N_{SPT} AND N_{10H}

Stjepan Strelec¹, Mario Gazdek², Boris Jedud³

¹ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, sstrelec@gfv.hr

² Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, mgazdek@gfv.hr

³ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, boris.jedud@yahoo.com

Sažetak: U ovome radu su prikazani rezultati istraživanja tla geofizičkim metodama koje se baziraju na spektralnoj analizi, odnosno disperziji brzine površinskih valova ovisno o frekvenciji. Seizmički presjeci višekanalne analize površinskih valova (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW), odnosno seizmičke sonde spektralne analize površinskih valova (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW) uspoređeni su s rezultatima ne-disperzivnih metoda refrakcijske seizmike i bušotinske downhole metode. Radi analize procjene krutosnih svojstava tla izvedenih iz brzine posmičnih valova, provedeni su i standardni geotehnički penetracijski pokusi (Standard Penetration Test, SPT i Dynamic Probe Heavy, DPH). Korelacije brzine posmičnih valova v_s i vrijednosti SPT-N i DPH-N pokusa su pokazale visoku pouzdanost procjene krutosti tla iz spektralnih metoda površinskih valova, prema kategorijama Eurokoda 8 (EC8).

Cljučne riječi: $v_{s,30}$, MASW, SPT, DPH, Eurokod 8

Abstract: In this paper, the results of geophysical surveying methods based on the surface waves are presented. Surface wave velocity dispersion depending on the frequency or spectral analysis was used for subsurface soil properties evaluation. Multichannel analysis of surface waves (MASW) seismic cross sections and spectral analysis of surface waves (SASW) seismic soundings were compared with results of non-dispersive seismic refraction and down-hole methods. In order to analyse the estimated value of soil stiffness derived from the shear wave velocity, geotechnical penetration tests (Standard Penetration Test, SPT and Dynamic Probe Heavy, DPH) were conducted. Statistical correlations of shear wave velocity (v_s) and dynamic penetration test blow counts (SPT-N and DPH-N) have revealed high confidence of the estimated soil stiffness based on the surface wave velocity for Eurocode 8 (EC8) ground types.

Keywords: $v_{s,30}$, MASW, SPT, DPH, Eurocode 8

Received: 30.01.2014 / Accepted: 06.05.2014

Prethodno priopćenje

1. UVOD

Ponašanje tla ovisi o veličini deformacija. U geotehnici je naročito zanimljivo parametriziranje tla pri malim i vrlo malim posmičnim deformacijama ($\gamma_s < 10^{-5}$) kod kojih se modul posmika G može smatrati relativno neovisnim od dimenzije posmičnih deformacija. Modul posmika pri takvim vrlo malim deformacijama se često, zapravo tradicijski, naziva dinamički modul posmika (G_{dyn} ili G_{max}) (Puech, 2004). Klasična podjela na „dinamičke i statičke“ veličine obzirom na brzinu nanošenja opterećenja je u tom smislu suvišna, budući da se te veličine mogu jasno odrediti obzirom na dimenziju relativne deformacije.

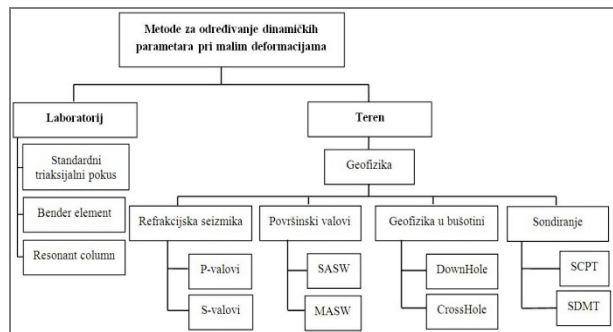
Primjena seizmičkih metoda posljednjih desetljeća, osobito višekanalne analize površinskih valova (Multi-Channel Analysis of Surface Waves, MASW) (Park, 1999), omogućava mjerenje i određivanje brzine posmičnih valova v_s koja se smatra bitnom fizikalnom veličinom za procjenu dinamičkih svojstava tla.

U ovom su radu prikazani rezultati istraživanja MASW metodom, a dinamička svojstava tla se procjenjuju iz vrijednosti v_s brzina posmičnih S valova, odnosno iz srednjih brzina $v_{s,30}$ do 30 metara dubine. Radi potvrde MASW rezultata, provedena su istraživanja i drugim seizmičkim metodama s površine odnosno iz bušotina. Spektar seizmičkih metoda uz MASW su činile površinske metode refrakcijske tomografije (Seismic Refraction Tomography, SRT) i spektralne analize površinskih valova (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW), odnosno metoda niz-bušotinu (Down-hole, DH), Slika 1.

Osim geofizičkih metoda, provedeni su i geotehnički penetracijski pokusi: standardni penetracijski test (Standard Penetration Test, SPT) i pokus s teškom udarnom sondom (Dynamic Probing Heavy, DPH). Iz podataka geotehničkih proba izvedene su korelacije između brzine posmičnih valova i broja udaraca SPT i DPH pokusa ($v_s - N_{SPT}$, $v_s - N_{10H}$), kao i korelacije između SPT i DPH mjerenja ($N_{SPT} - N_{10H}$).

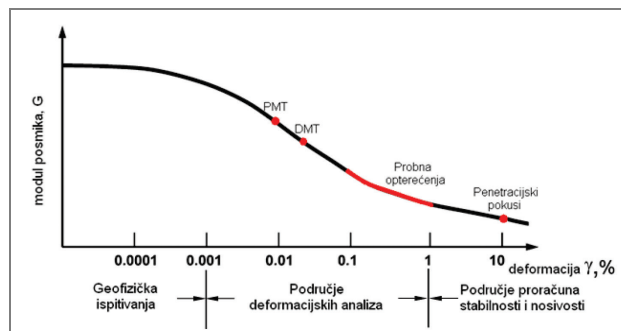
Sva mjerenja su izvedena na području grada Varaždina, u šljunkovitim aluvijalnim slojevima.

Odnos krutosti, odnosno modula posmika i pripadnih relativnih deformacija $\gamma - G$, obzirom na vrstu primijenjenih ispitivanja u geotehničkoj praksi prikazuje Slika 2.



Slika 1. Metode koje se najčešće primjenjuju za određivanje dinamičkih svojstava tla pri malim deformacijama

Brzina v_s se osim u geotehnici za određivanje mehaničkih svojstava tla, koristi i radi seizmičkog mikrozoniranja. U Republici Hrvatskoj prihvaćen je Eurokod 8 (EC8) – Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija (HRN EN 1998-1:2011), a u tom standardu tlo se klasificira u sedam tipova koji su opisani stratigrafskim profilom s tri parametra: srednjom brzinom posmičnih valova do 30 metara dubine $v_{s,30}$, brojem udara standardnog penetracijskog pokusa N_{SPT} i nedreniranom posmičnom čvrstoćom c_u .



Slika 2. Raspodjela krutosti tla u ovisnosti o veličini deformacija i metodi ispitivanja (Luna, R., Jadi, H., 2000.)

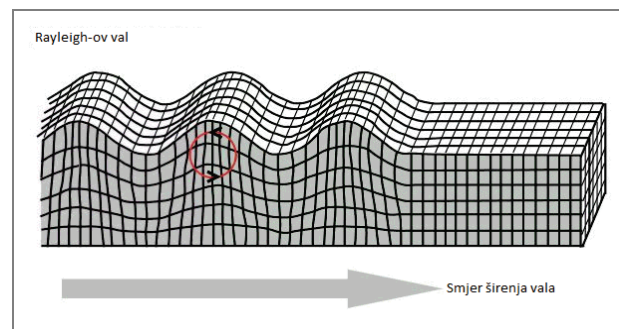
2. SVOJSTVA I METODE SNIMANJA POVRŠINSKIH VALOVA

2.1. Svojstva površinskih valova

Seizmički valovi se u beskonačnom, homogenom i izotropnom mediju šire kao tlačni/uzdužni P i posmični/transverzalni S prostorni valovi. S približavanjem granici poluprostora ti se valovi transformiraju u površinske valove. Kada se za generiranje seizmičkih valova na površini terena koriste vertikalni izvori poput čekića ili pada utega (drop-

weight), onda neposredno nastaju površinski Rayleighevi (R) valovi koji u najvećoj mjeri preuzimaju seizmičku energiju izvora. Distribucija energije prema vrsti valova: R valovi nose 67%, dok S i P valovi preuzimaju 26%, odnosno 7% seizmičke energije (Telford, 1990).

Složeni oblik Rayleighevih valova se sastoji od longitudinalnog i transverznog gibanja s međusobnim pomakom u fazi. Materijalna supstanca prelazi eliptičku putanju kojoj je velika poluos vertikalna kada je val blizu površine, Slika 3. Rayleighevi valovi često se nazivaju i valjanje tla (Ground Roll, GR).



Slika 3. Širenje Rayleighevog vala

Prostorni P i S valovi ne pokazuju značajnije rasipanje energije po frekvencijama, međutim najvažnije svojstvo R valova je upravo disperzija energije koju nosi po frekvencijama. Tako se valovi niže frekvencije, odnosno veće valne duljine šire dublje u medij, dok valovi visoke frekvencije i male valne duljine prodiru vrlo plitko. Brzina širenja vala pri pojedinoj frekvenciji f se naziva fazna brzina $v_{R\phi}$, a krivulja koja prikazuje faznu brzinu u ovisnosti o frekvenciji naziva se krivulja fazne brzine ili disperzijska krivulja, $v_{R\phi} = v_R(f)$.

Pojava više faznih brzina na određenoj frekvenciji naziva se višemodalna disperzija (Park, 1998). Dakle, energija se pri određenoj frekvenciji može prenositi različitim brzinama, pa se u tom slučaju najsporiji mod naziva osnovni M_0 mod, a sljedeći s većom brzinom je prvi viši M_1 mod. Sukcesivno slijede drugi, treći i ostali viši modovi. Fazna brzina širenja Rayleighevih valova prvenstveno ovisi o brzini posmičnih valova. Izraz koji pokazuje odnos između brzine posmičnih valova v_s i brzine Rayleighevih valova v_R je sljedeći:

$$v_s = P v_R \quad (1)$$

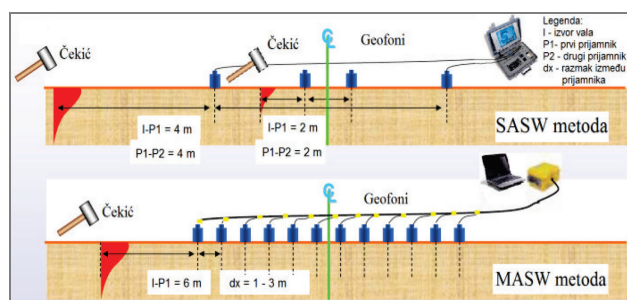
U tom izrazu je P konstanta ovisna o Poissonovom koeficijentu ν (primjerice $P = 1.09$ za $\nu = 0.25$, Stokoe, 1994).

2.2. SASW i MASW

SASW metoda se bazira na spektralnoj analizi površinskih valova te kao rezultat daje sondažni 1D profil brzine posmičnih valova v_s po dubini (Heisey, 1982). U standardnoj SASW metodi se koriste samo dva geofona, a početni geofonski razmak i razmak

između prvog geofona i izvora se postupno povećava da bi se postigla ciljana dubina istraživanja, Slika 4.

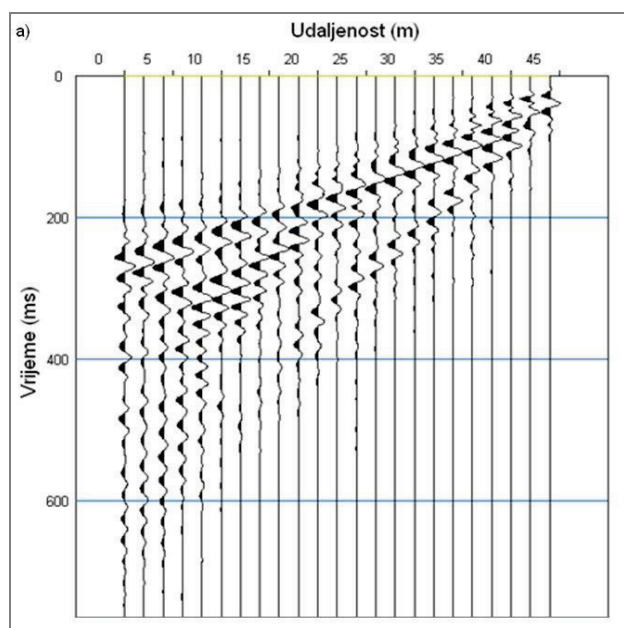
Višekanalni pristup, kod kojega nije potrebno mijenjati raspored i pozicije geofona, koristi MASW metoda. Za 1D ili 2D seizmički profil brzine posmičnih valova v_s s dubinom, potrebno je promijeniti samo pozicije izvora seizmičkih valova. Na višekanalnoj snimci mogu se prepoznati osnovni i viši modovi površinskih valova, ali i smetnje kao što su zračni, direktni i prostorni valovi (Park, 2007). Princip višekanalnog snimanja osigurava veći broj i višu kvalitetu podataka tijekom snimanja, a to onda izravno omogućava korektniju i pouzdaniju interpretaciju (Park, 1999).



Slika 4. SASW i MASW metode snimanja površinskih valova

Postupak primjene MASW metode sastoji se od tri osnovna koraka:

1. Snimanje površinskih valova i prikupljanje terenskih podataka, Slika 5.a,
2. Konstrukcija disperzijske slike na kojoj se određuje disperzijska krivulja, Slika 5.b (lijevo),
3. Inverzija ili izračun brzine širenja posmičnih valova s dubinom, Slika 5.b (desno).

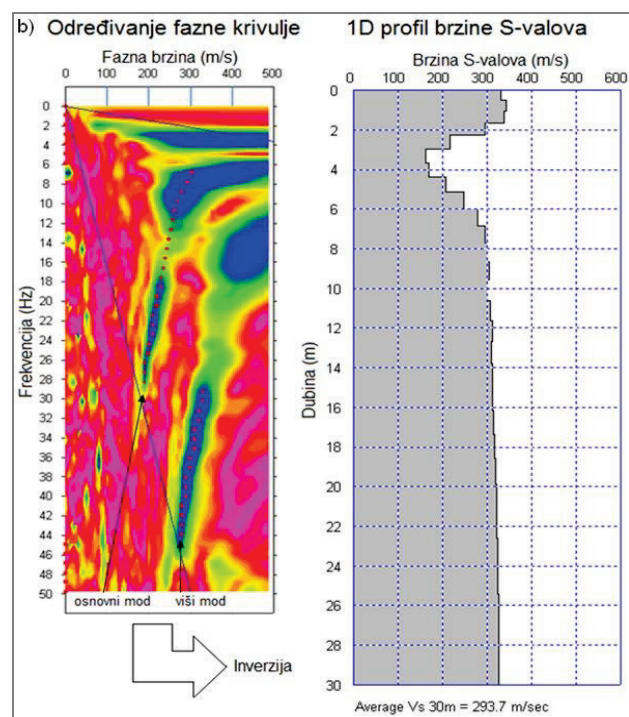


Slika 5a. Snimka Rayleighevih valova

3. IN-SITU ISPITIVANJA DINAMIČKIH SVOJSTAVA TLA

3.1. Ispitivanje dinamičkim prodiranjem

Dinamički penetracijski pokusi najčešće se koriste kao geotehnička in-situ ispitivanja radi određivanja mehaničkih svojstava tla. Postoji veliki broj inačica sonde za dinamičko prodiranje. U ovome istraživanju su se koristile dvije vrste pokusa: SPT prema normi EN ISO 22476-3 te DPH prema normi EN ISO 22476-2 (HRN EN 1997-2, 2008). Brojni autori predlažu različite korelacije broja SPT i DPH udaraca, a u ovom su radu predstavljene korelacije za šljunkovite formacije koje su dominantne u istraživanom području. Prednost ispitivanja penetracijskim pokusima je relativno jednostavna interpretacija rezultata mjerenja. Međutim, rezultati predstavljaju samo točkasti, odnosno 1D podatak za promatrane lokaciju-sondu.



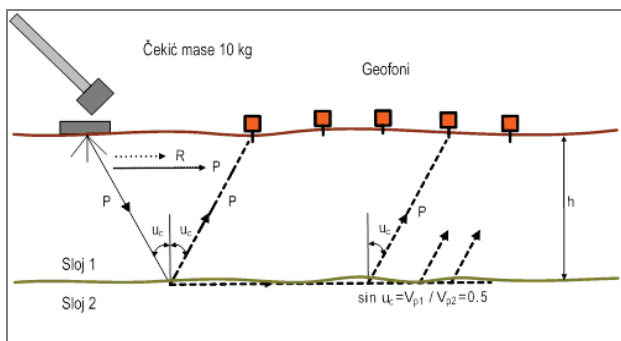
Slika 5b. Određivanje disperzijske krivulje i rezultat inverzije

3.2. Refrakcijska seizmika

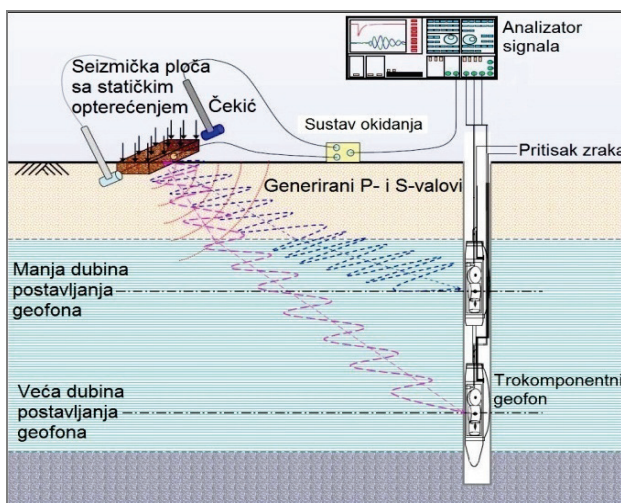
Ovom metodom se mjere vremena prvih nailazaka seizmičkih valova na geofone postavljene u nizu, Slika 6. Vremena se očitavaju sa snimljenih seizmograma, a prvi nailasci se odnose na prostorne P ili S valove što već ovisi o načinu generiranja seizmičkog poremećaja. Pikiranje i korespondencija vremena s odgovarajućim refraktorima najosjetljiviji je dio prilikom interpretacije. Princip CAD (Computer Aided Tomography) daje korektnu sliku kad god se uvažavaju relevantni podaci geotehničkog profila, a time se ujedno umanjuje moguća višeznačnost zbog inverzije brzina po dubini.

3.3. Down-hole metoda

Down-hole je bušotinska seizmička metoda koja se koristi za određivanje vrsta i mehaničkih svojstava tla i stijena u neposrednoj okolini bušotine. Iz izmjerenih vremena nailaska prostornih P i S valova do trokomponentnog geofona smještenog u bušotini, te poznate udaljenosti izvor-geofon, mogu se odrediti intervalne brzine za različite dubine, Slika 7. Budući da trokomponentni bušotinski geofon ima jedan vertikalni i dva horizontalno postavljena geofona, mogu se registrirati nailasci uzdužnog P vala, ali i vertikalno odnosno horizontalno polariziranih posmičnih valova SV i SH. Pojedinom tipu vala odgovaraju odrediti intervalne brzine v_P , v_{SP} i v_{SH} .



Slika 6. Metoda refrakcijske seizmike



Slika 7. Down-hole metoda

4. ODREĐIVANJE DINAMIČKIH KONSTANTI ELASTIČNOSTI

Primjena seizmičkih metoda u istraživanju i određivanju mehaničkih svojstava tla i stijena nalazi uporište u ključnoj činjenici da je brzina poprečnog vala v_s ovisna o posmičnoj čvrstoći, dok brzina uzdužnog vala v_p ovisi o tlačnoj čvrstoći.

Osnovne dinamičke konstante (ili moduli) elastičnosti geomedija su: Youngov modul E_{dyn} , obujamski modul K_{dyn} , modul posmika G_{dyn} i modul kompresijskih valova M_{dyn} . Ti se moduli elastičnosti pri vrlo malim

deformacijama mogu izračunati iz v_p i v_s brzina određenih in-situ seizmičkim mjerenjima. Osim njih, može se odrediti i Poissonov koeficijent ν_{dyn} . Odnos konstanti i brzina je određen sljedećim izrazima (ABEM, 1989):

$$\begin{aligned} V_p &= ((K_{dyn} + 4/3 G_{dyn}) \rho^{-1})^{1/2} = \\ &= ((1 - \nu_{dyn}) G_{dyn} (0.5 - \nu_{dyn})^{-1} \rho^{-1})^{1/2} \\ v_p &= \sqrt{\frac{K_{dyn} + G_{dyn} \cdot 4/3}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1 - \nu) \cdot G_{dyn}}{(0.5 - \nu) \cdot \rho}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_s &= (E_{dyn} (2 \rho)^{-1} (1 + \nu_{dyn})^{-1})^{1/2} = (G_{dyn} \rho^{-1})^{1/2} \\ v_s &= \sqrt{\frac{E_{din}}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G_{dyn}}{\rho}} \end{aligned} \quad (3)$$

Seizmičkom interpretacijom istovremeno se određuju i brzine i debljine pojedinih formacija. Poznavanjem gustoće ρ geomedija i brzina elastičnih valova, mogu se odrediti vrijednosti dinamičkih konstanti: E_{dyn} , K_{dyn} , G_{dyn} i M_{dyn} . Ako se omjer brzina v_p/v_s označi s α , može se pojedinačno izraziti svaka konstanta:

$$\begin{aligned} \nu_{dyn} &= 0.5 (\alpha^2 - 2) (\alpha^2 - 1)^{-1} \\ \nu &= \frac{\alpha^2 - 2}{2 \cdot (\alpha^2 - 1)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_{dyn} &= \rho v_p^2 (1 - 2\nu_{dyn}) (1 + \nu_{dyn}) (1 - \nu_{dyn})^{-1} \\ E_{dyn} &= \rho \cdot v_p^2 \frac{(1 - 2 \cdot \nu) \cdot (1 + \nu)}{1 - \nu} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} G_{dyn} &= \rho v_s^2, \quad M_{dyn} = \rho v_p^2 \\ G_{dyn} &= \rho \cdot v_s^2, \quad M_{dyn} = \rho \cdot v_p^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_{dyn} &= E_{dyn} (3 - 6\nu_{dyn})^{-1} \\ K_{dyn} &= \frac{E_{dyn}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \end{aligned} \quad (7)$$

Tla općenito imaju manje brzine u odnosu na stijene. Međutim, prisutnost podzemne vode u nekoherentnim tlima može uzrokovati znatan porast brzine v_p koja tada nerijetko prelazi vrijednost 1500 m/s. Prisutnost podzemne vode ili pak stupanj saturacije ne utječe na promjenu brzine v_s . Zbog toga vrijednost Poissonovog koeficijenta može biti vrlo blizu maksimuma, odnosno može iznositi 0.48 ili 0.49 (Zonge Int. Inc., 2014). Iako je to seizmički realan događaj, ipak se te vrijednosti bez prethodne korekcije brzine P vala u samom geomediju, ne bi smjele koristiti za proračun elastičnih konstanti.

Izraz $v_p/v_s = ((1 - \nu_{dyn}) / (0.5 - \nu_{dyn}))^{1/2}$ prikazuje odnos između seizmičkih brzina i Poissonovog koeficijenta, Slika 8.

5. TIPOVI TLA PREMA EUROKODU 8

Eurokod 8 razlikuje sedam tipova tla u odnosu na seizmičku osjetljivost: A, B, C, D, E, S1 i S2, Tablica 1.

Prema tom standardu, tipovi tla su opisani stratigrafskim profilom i s tri parametra ($v_{s,30}$, N , c_u): $v_{s,30}$ je srednja brzina posmičnih valova do 30 metara dubine, N je srednji broj udaraca dinamičke probe, a c_u je srednja nedrenirana posmična čvrstoća.

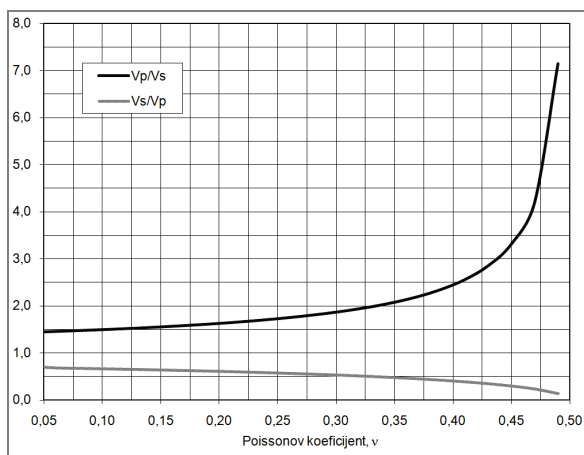
Tablica 1. Tipovi tla prema Eurokodu 8 (HRN-EN 1998, 2008)

TIP TLA	OPIS STRATIGRAFSKOG PROFILA	$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (udarci/30 cm)	c_u (kPa)
A	Stijena ili njoj slične geološke formacije, uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini	> 800	-	-
B	Slojevi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo čvrste gline, debljine najmanje nekoliko desetina metara, karakterizirani stupnjevitim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom	360÷800	> 50	> 250
C	Slojevi zbijenog ili srednje zbijenog pijeska, šljunka ili čvrste gline, debljine od nekoliko desetina do više stotina metara	180÷360	15÷50	70÷250
D	Rastresiti do srednje zbijeni nevezani sedimenti (s ili bez mekih kohezivnih slojeva) ili predominantno mekano do čvrsto kohezivno tlo	< 180	< 15	< 70
E	Tlo se na površini sastoji od aluvijalnih nanosa sa vrijednosti $v_{s,30}$ prema tipu C ili D i debljinom između 5 i 20 m, ispod kojeg je krući materijal sa $v_{s,30} > 800$ m/s			
S ₁	Tlo sadrži najmanje 10 m debeo sloj mekane gline s visokim plastičnim indeksom ($PI > 40$) i viskom sadržajem vode	< 100 (indikativno)	-	10÷20
S ₂	Tlo podložno likvefakciji s osjetljivim glinama ili bilo koji drugi profil tla koji nije uključen u kategorije A-E ili S ₁			

$v_{s,30}$ – srednja vrijednost brzine poprečnih površinskih valova do dubine 30 m u profil tla

N_{SPT} – standardni penetracijski test (broj udara)

c_u – nedrenirana posmična čvrstoća tla



Slika 8. Odnos seizmičkih brzina i Poissonovog koeficijenta

Srednje vrijednosti tih parametara se računaju obzirom na debljine h_i pojedinog od ukupno n slojeva tla, prema sljedećem izrazu u kojem meta varijabla X predstavlja bilo koji od tri navedena parametra ($X = v_{s,30}$ ili N ili c_u):

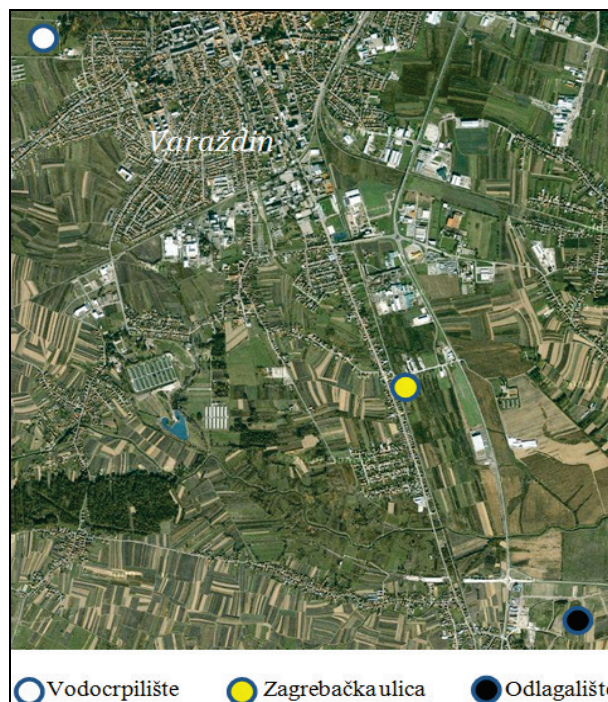
$$X = \frac{\sum h_i}{\left(\sum \left(\frac{h_i}{X}\right)\right)} \quad (8)$$

ili

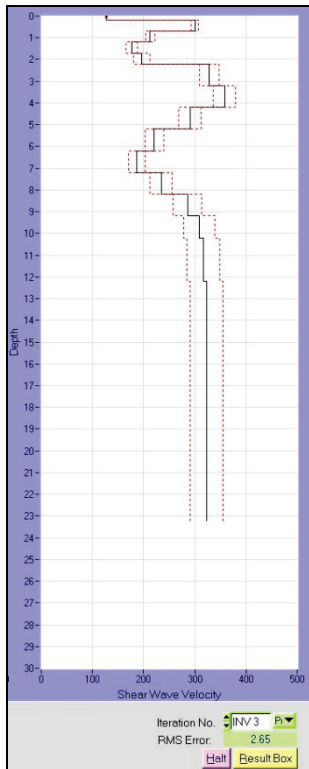
$$v_{s,30} = \frac{\sum h_i}{\left(\sum \left(\frac{h_i}{v_{s,30}}\right)\right)} \quad (8)$$

$$v_{s,30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{v_{s,i}}\right)}$$

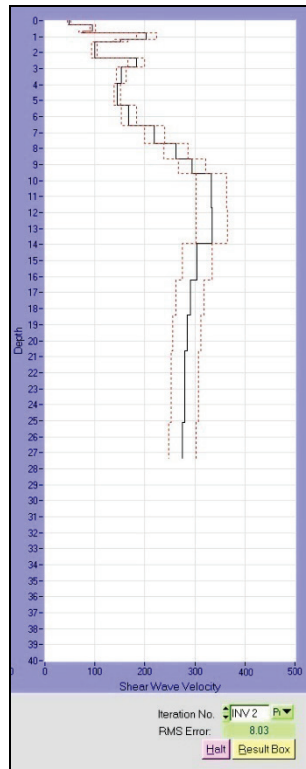
6. MJERENJA I REZULTATI PROVEDENIH ISTRAŽIVANJA



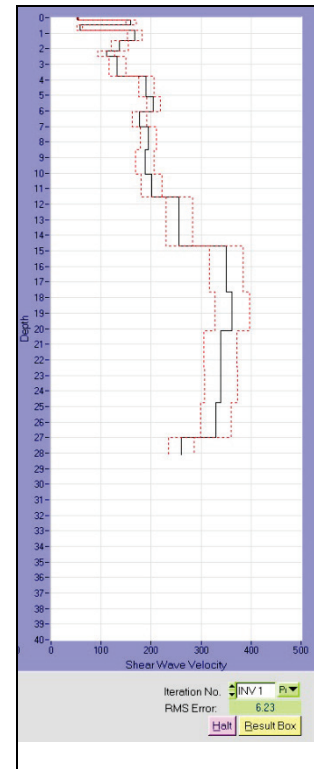
Slika 9. Situacijska karta istraživanja



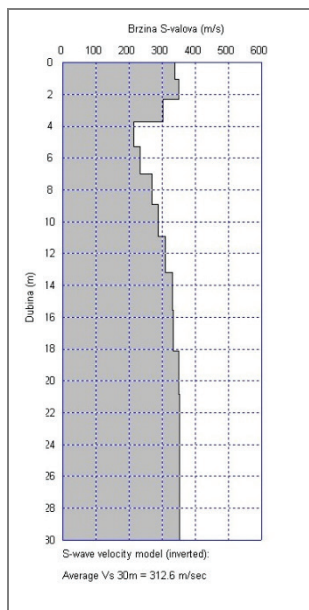
a. SASW - Vodocrpilište



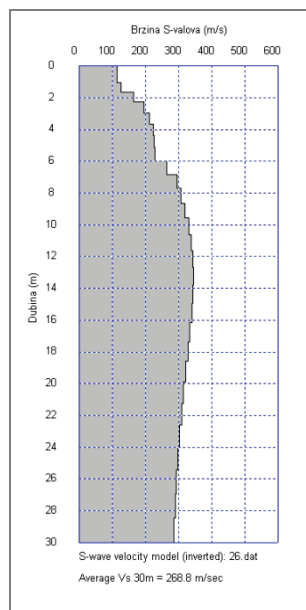
c. SASW – Zagrebačka ulica



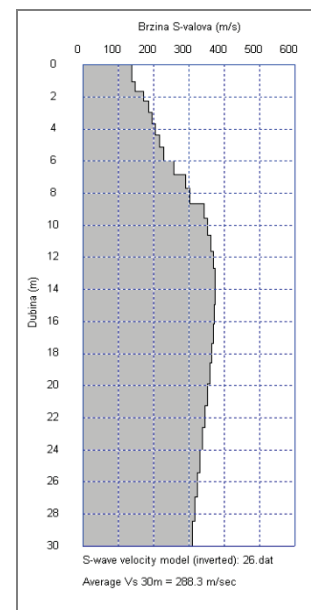
e. SASW – Odlagalište



b. MASW - Vodocrpilište



d. MASW - Zagrebačka ulica



f. MASW – Odlagalište

Slika 10. Interpretacije SASW i MASW metodama za istraživana područja

Istraživanja su provedena na tri lokacije unutar šireg područja grada Varaždina, Slika 9, koje leži na šljunkovitim nanosima znatne debljine (aluvij rijeke Drave). Na sve tri istražne lokacije (vodocrpilište Varaždin, poslovni objekt u Zagrebačkoj ulici i odlagalište otpada Kneginec), provedena su sljedeća mjerenja i ispitivanja: određivanje seizmičkih brzina SASW, MASW i refrakcijskom metodom, te određivanje

broja udara SPT i DPH pokusima. Dodatno su na lokaciji uz odlagalište izvedena i down-hole mjerenja u postojećem piezometru P-7 do dubine 20 m (Premur, 2004).

Osnovna značajka geološke građe aluvijalne dravske ravnice je prisutnost isključivo sedimentnih naslaga kvartarne starosti. Debljina istaloženih šljunkovito - pjeskovitih naslaga rijeke Drave raste od zapada prema

istoku, tako da se debljina sedimentnog kompleksa na području Varaždina procjenjuje na preko 60 m. Osnovno obilježje formacija je visoka vodopropusnost šljunka, a razina podzemne vode relativno je visoka (2÷6 m ispod razine terena).

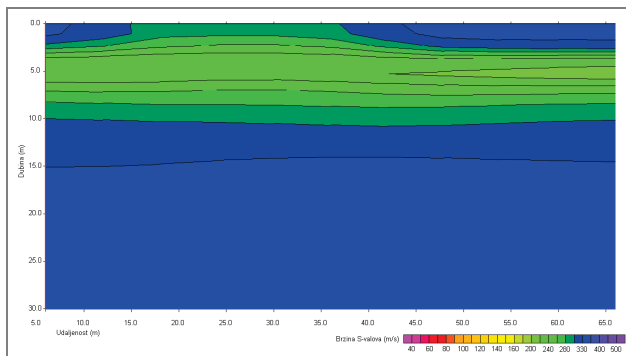
6.1. MASW i SASW mjerenja

MASW profil ili dispozitiv se sastojao od 24 vertikalna geofona frekvencije 4.5 Hz, koji su bili postavljeni na međusobnom jednakom razmaku od 3 m.

Takav razmak je osigurao dovoljnu razlučivost površinskih slojeva. Najmanja dubina istraživanja Z_{min} uvjetovana je geofonskim razmakom dx i to prema relaciji $Z_{min} = k dx$ ($0.3 \leq k \leq 1.0$) (Park, 2014). Duljina geofonskog rasporeda, odnosno dispozitiva D direktno utječe na najveću dubinu istraživanja Z_{max} , jer vrijedi odnos: $D = m Z_{max}$ ($1 \leq m \leq 3$).

Preporuka je da udaljenost od izvora do prvog geofona x_1 u dispozitivu bude u rasponu $0.2 \div 1.0 D$. Za interpretaciju snimljenih podataka koristilo se programski paket SeisImager.

Slika 10 prikazuje rezultate ispitivanja SASW i MASW metodama na svim lokacijama. Naročito zanimljivu 2D interpretaciju dala su MASW mjerenja na lokaciji vodocrpilišta Varaždin, Slika 11. Uočeno je da površinski slojevi do dubine 4 m imaju brzine v_s od približno 300 m/s, odnosno neočekivano veće od brzina koje imaju dublji slojevi. Takav je odnos potvrđen i SASW mjerenjima i interpretacijom. Dodatno su i rezultati penetracijskih pokusa ukazali na ovu inverziju, jer je broj udaraca u toj površinskoj zoni bio znatno veći nego na većim dubinama.



Slika 11. MASW 2D interpretacija prikazuje brzine posmičnih valova na lokaciji vodocrpilište Varaždin

Za ovakve se inverzije pri interpretaciji MASW mjerenja koristi fundamentalni ili osnovni mod. Obzirom da inverzija ukazuje na složeniji, odnosno inverzno disperzivni profil krutosti, u interpretacijama se u obzir uzeo i utjecaj viših modova (Xia, 2000). U ovom specifičnom slučaju, tek na dubini od 7 m brzine S valova pokazuju blagi trend porasta s dubinom. Prosječna brzina na toj lokaciji do dubine 30 m je $v_{s,30} = 312$ m/s. Na preostale dvije lokacije, u Zagrebačkoj ulici i na odlagalištu, brzine v_s pokazuju sličan trend konstantnog i blagog porasta brzine s dubinom. Prosječne brzine $v_{s,30}$ su u rasponu od 270 do 290 m/s. Zona veće brzine se nalazi

na dubinama 9÷14 m u Zagrebačkoj ulici, dok je na odlagalištu takva zona pomaknuta dublje na 15÷20 m.

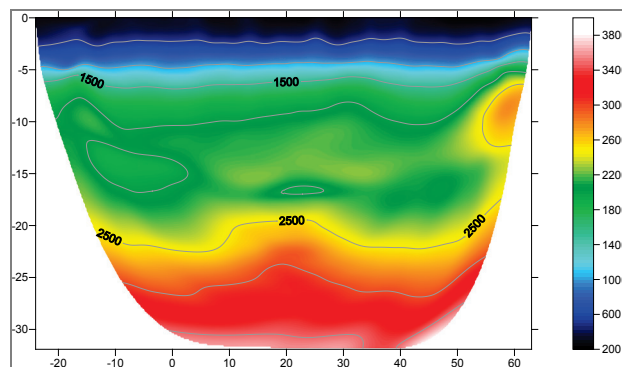
Tijekom SASW mjerenja početni razmak geofona je iznosio 1 m i udvostručavao se za veće dubinske zahvate. Za interpretaciju se koristio programski paket Win SASW 2.4.0.

6.2. Refrakcijska seizmika

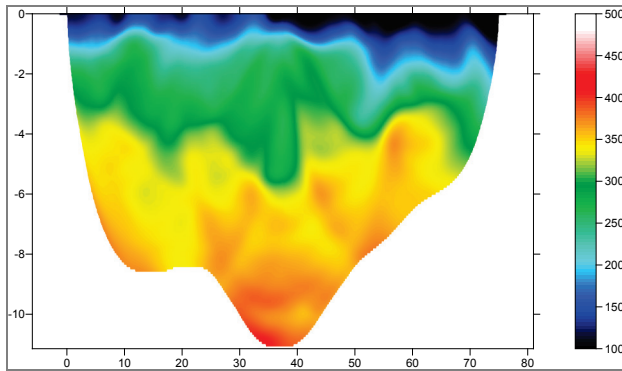
Plitka seizmička refrakcija, odnosno refrakcijska tomografija provedena je s P i S valovima. Seizmički dispozitiv se sastojao od 24 vertikalna geofona frekvencije 4.5 Hz za snimanje P valova i isto toliko horizontalnih geofona frekvencije 10 Hz za snimanje S valova. Geofonski razmak iznosio je 3 m. S valovi generirali su se s obje strane metalne konstrukcije tako su se njihovi seizmogrami razlikovali za π pomak u fazama. Iz tako dobivenih snimaka bilo je moguće precizno i nedvosmisleno određivanje vremena prvih nailazaka S valova. Podaci mjerenja su interpretirani WET metodom iz paketa Rayfract 2.63 (Intelligent Resources Inc.).

Ograničenje refrakcijske metode je očekivanje porasta brzine seizmičkih valova s dubinom. Zbog toga nije moguća interpretacija sloja manje brzine ispod sloja veće brzine. To se najčešće rješava dovoljno velikim offsetom ili pomakom rubnih izvora tako da se dosegne temeljna stijena ili osnovni sloj najveće brzine.

Tomografski prikaz brzina P valova omogućuje određivanje položaja vodonosnog horizonta na dubini od 4÷5 m. Pogodan primjer za takvu interpretaciju je lokacija vodocrpilišta Varaždin, Slika 12. Ovisno o zbijenosti, brzine v_p u suhom pijesku i šljunku mogu imati vrijednosti u intervalu 300÷1000 m/s, dok vodom saturirani šljunak može imati brzine 1500÷2700 m/s. Podzemna voda predstavlja problem u interpretaciji, jer čini barijeru koja sprečava detekciju nailazaka P valova s dubljih refraktiranih slojeva. Na S valove podzemna voda nema utjecaj te time omogućava bolju razlučivost različitih geoloških slojeva, a time i njihovu krutost. Zanimljivo je da u navedenom primjeru na vodocrpilištu, dubinski zahvat S valova nije veći od dosega P valova koji nose manje energije. Dapače, znatno je manji, ali je razlučivost gornje zone do dubine 10 m znatno veća, odnosno bolja. Izravnim mjerenjem brzina S valova, brzine od 300 m/s se dostižu već na dubinama od 4 m i rastu s dubinom.

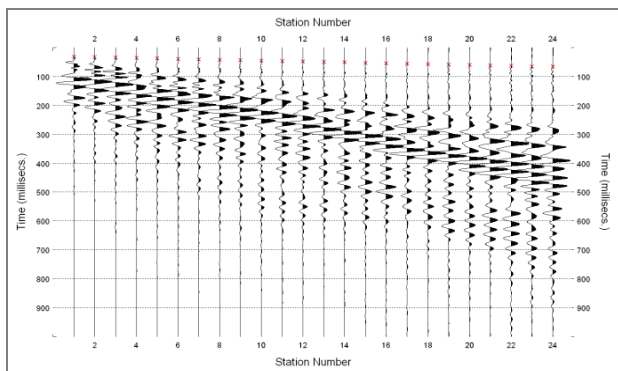


Slika 12. 2D prikaz brzina P valova na lokaciji vodocrpilišta Varaždin



Slika 13. 2D prikaz brzina S valova na lokaciji vodocrpilišta Varaždin

Amplitude prvih nailazaka P valova, označene crvenim markerima na seizmogramu, pokazuju da uzdužni P valovi nose znatno manji dio energije izvora, za razliku od kasnijih površinskih R valova koji imaju osjetno veće amplitude, Slika 14. To svojstvo značajno otežava njihovo pikiranje, naročito ako se mjerenja izvode u okolini opterećenoj seizmičkim smetnjama.



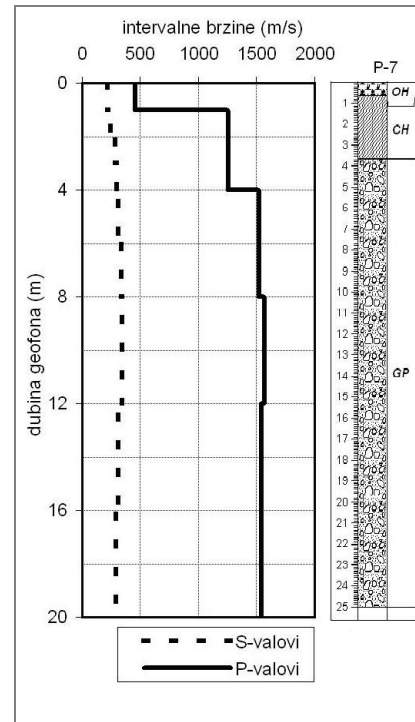
Slika 14. Seizmogram prostornih P valova i površinskih R valova

6.3. Down-hole metoda

Down-hole bušotinska seizmička metoda se primijenila samo na odlagalištu, jer je na toj lokaciji već postojao piezometar pogodan za mjerene brzine P i S valova. Koristio se tro-komponentni Borehole Pick M3049 geofon (OYO Instruments). Rezultati tog mjerenja su trebali potvrditi odnos brzina P i S valova u potpuno saturiranim šljuncima, odnosno u suhim šljuncima. Vrijednosti intervalnih brzina P i S valova uspoređene su s vrijednostima P i S refrakcijskih interpretacija, a pokazuju slične vrijednosti i trendove promjena kao i brzine određene SASW i MASW metodama. Sondažni profil istražnog bušenja se razmjerno dobro poklapa s down-hole profilom brzina, Slika 15.

Ispod sloja humusa zaliježe glina do 3.8 m, a dublje je nabušen slabo graduirani šljunak. Za vrijeme ispitivanja razina podzemne vode je bila na 3.92 m ispod razine površine terena. Utjecaj podzemne vode na brzinu P valova uočen je i u mjerenjima down-hole metodom. Zbog toga su se vrijednosti dinamičkih konstanti

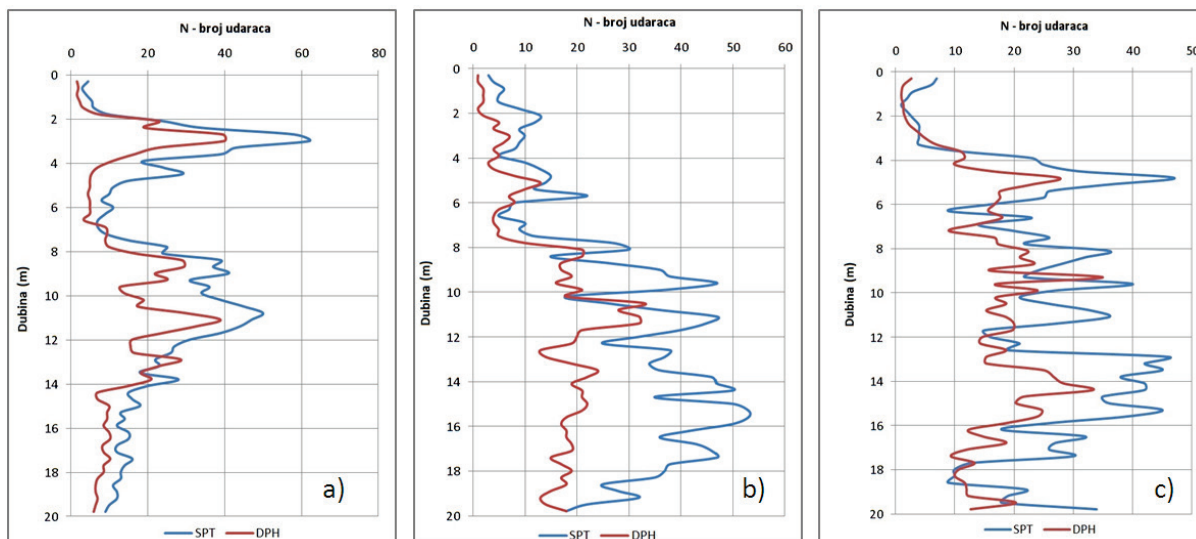
elastičnosti korigirale prema empirijskom odnosu $v_p/v_s=1.8$ u šljunkovitim materijalima (Castagna, 1985). Iz takvog se empirijskog omjera može odrediti korigirana vrijednost Poissonovog koeficijenta ≈ 0.31 , kao što prikazuje Tablica 2. Dinamičke intervalne konstante elastičnosti se proračunavaju iz intervalnih brzina, odnosno brzina koje se određuju za pojedini interval dubine omeđen dvama uzastopnim pozicijama geofona u bušotini.



Slika 15. Intervalne brzine određene down-hole metodom i usporedba sa sondažnim profilom

Tablica 2. Dinamičke intervalne konstante elastičnosti

Dubina geofona (m)	Dinamičke intervalne konstante elastičnosti				
	Poissonov koeficijent	Youngov modul	Modul posmika	Mod. obj. elastičn.	
	$v_{dyn. (-)}$	$v_{dyn. (-)}$ korigiran	$E_{dyn. (MPa)}$	$G_{dyn. (MPa)}$	$K_{dyn. (MPa)}$
1	0,353	0,353	237	88	269
2	0,481	0,308	282	108	245
3	0,474	0,308	384	147	334
4	0,471	0,308	430	164	374
6	0,479	0,308	457	174	397
8	0,475	0,308	552	211	481
12	0,475	0,308	571	218	497
16	0,479	0,308	471	180	410
20	0,482	0,308	406	155	353



Slika 16. Dijagrami broja udaraca N_{SPT} i N_{DPH} na lokacijama: a) vodocrpilište, b) Zagrebačka ulica, c) odlagalište

SPT i DPH dinamički penetracijski pokusi su izvedeni na svim lokacijama. Kroz pozicije dinamičkih sondi kasnije su postavljeni MASW i SASW dispozitivi radi analize promjena otpora prodoru šiljka u odnosu na brzine S vala. Istovremeno su zanimljive i SPT – DPH korelacije, odnosno korelacije diskretnog SPT pokusa u kojem se broje udarci za penetraciju sonde od 30 cm pri padu utega od 63 kg s visine 76 cm u određenim točkama sondažnog profila i kontinuiranog DPH pokusa u kojem se broje udarci za penetraciju sonde od 10 cm pri padu utega od 50 kg s visine 50 cm. Iz usporednih dijagrama odnosa broja udaraca po dubini na istražnim lokacijama, Slika 16, izražen je korelacijski odnos SPT – DPH za svaku lokaciju, Slika 17, 18 i 19.

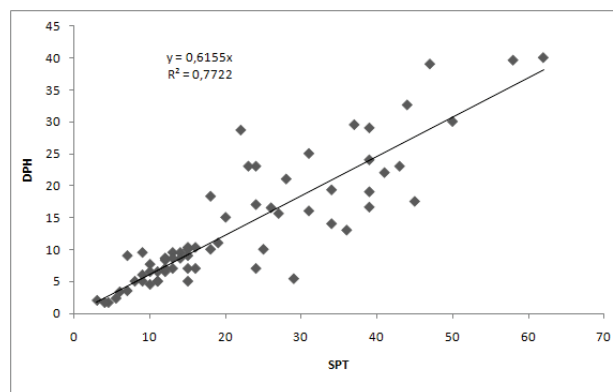
Uočeni odnos može se izraziti relacijom:

$$N_{DPH} = C N_{SPT} \quad (0.5 \leq C \leq 0.6). \quad (9)$$

Budući da su mjerenja i korelacije izvedene samo za krupnozrnce šljunkove i šljunkovite materijale, ustanovljena diskrepancija brojeva N_{SPT} i N_{DPH} kao i osjetno rasipanje podataka nije iznenađujuće. Korelacija SPT i DPH broja udaraca koju navodi Spagnoli (2008) ima isti oblik, a $C = 0.5$ (u izvornim oznakama: $N_{10H} = 0.5 N$). Autor navodi utjecaje raznih faktora koji doprinose znatnoj disperziji rezultata SPT i DPH proba.

Pokazalo se da su bolje korelacije u pjeskovito prašinastim materijalima. Uzrok značajnijih odstupanja u broju SPT i DPH udaraca je pojava valutica šljunka većih dimenzija u odnosu na promjer sonde, zbog čega se otpor prodoru znatno poveća. Krivulja sondiranja u takvim sredinama ima primjetne skokove vrijednosti broja udaraca pa naizgled ne prati očekivani trend blagog porasta s dubinom. Očito je da u nevezanim sedimentima granulometrijski sastav može biti jedan od glavnih uzroka značajnoj disperziji podataka i značajnijim odstupanjima po dubini.

7. ODNOS v_s - N_{SPT} i v_s - N_{10H}



Slika 17. Korelacija $N_{10H} = f(N)$ za lokaciju Vodocrpilište

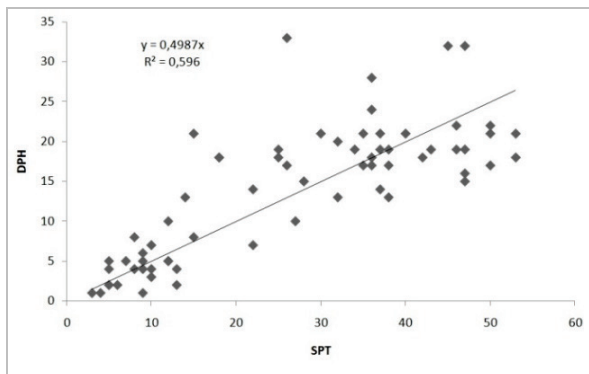
Brzina v_s posmičnih valova i broj udaraca penetracijskih pokusa N_{SPT} ili N_{10H} ukazuju na isto važno svojstvo geomedija, a to je krutost. Prema tome bi korelacija između ova dva parametra trebala biti opravdana. U literaturi postoji velik broj korelacija eksperimentalnih mjerenja, a opći oblik funkcijske ovisnosti je uglavnom eksponencijalni (Hanumantharao, 2008):

$$v_s = AN^B \quad (10)$$

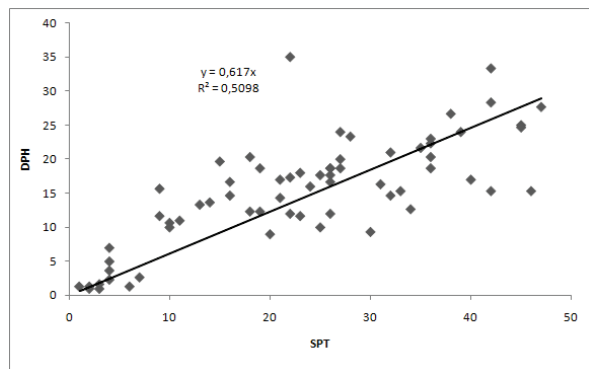
Prilikom interpretacije regresijske analize, osim regresijskog koeficijenta r , vrlo je značajan i koeficijent determinacije $R = r^2$. Po definiciji, koeficijent determinacije je varijanca procjene kriterijske varijable, a može se interpretirati kao mjera efikasnosti regresije, odnosno uspješnosti prognoze.

U obliku korelacije prema izrazu 10, A i B su konstantne vrijednosti koje se određuju eksperimentalno, a često su lokalno specifične pa se uz njih prikazuje i

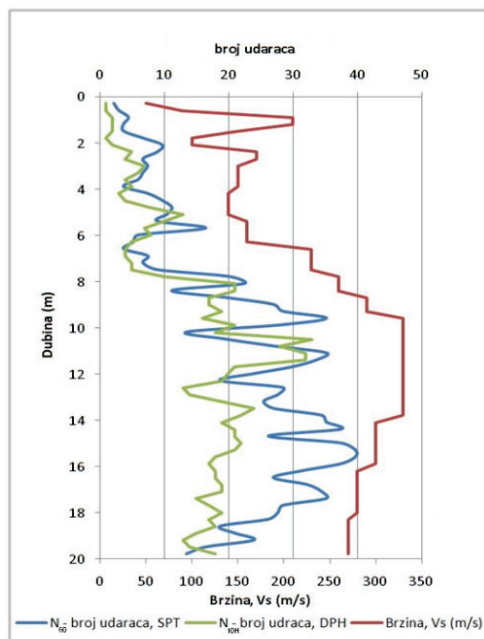
kvadratno odstupanje R^2 . U ovom radu je također primijenjen eksponencijalni oblik odnosa, a primjer dijagrama brzine v_s posmičnih valova i broja udaraca penetracijskih pokusa prikazuje Slika 20. Broj SPT udaraca se radi usporedbe s DPH vrijednostima korigirao na broj N_{60} .



Slika 18. Korelacija $N_{10H} = f(N)$ za lokaciju Zagrebačka ulica



Slika 19. Korelacija $N_{10H} = f(N)$ za lokaciju Odlagalište

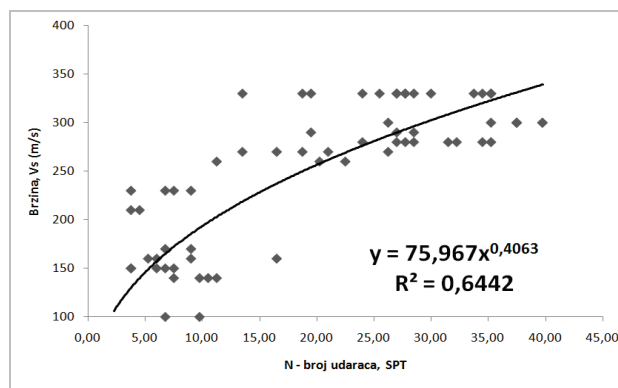


Slika 20. Dijagram odnosa brzine v_s i broja udaraca N_{60SPT} i N_{10H} (lokacija b) Zagrebačka ulica

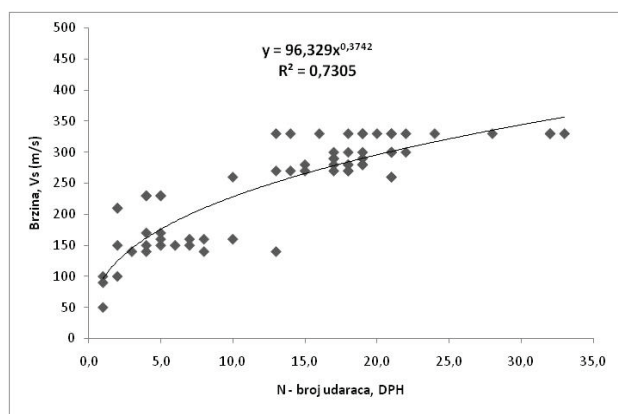
Prikazani dijagram je bio model za analizu rezultata mjerenja na svim lokacijama i izdvajanje korelacija v_s - N_{60SPT} , odnosno v_s - N_{10H} . Slika 21 prikazuje korelaciju v_s - N_{60SPT} , dok Slika 22 prikazuje korelaciju v_s - N_{10H} za krupnozrne šljunkovite materijale:

$$v_s = 76 N_{60SPT}^{0.4} \quad (R^2 = 0.64) \quad (11)$$

$$v_s = 96 N_{10H}^{0.37} \quad (R^2 = 0.73) \quad (12)$$



Slika 21. Korelacija $v_s = f(N_{60SPT})$ za istraživane krupnozrne šljunke



Slika 22. Korelacija $v_s = f(N_{10H})$ za istraživane krupnozrne šljunke

Ustanovljeno je da promjene DPH udaraca u krupnozrnim šljunkovitim materijalima bolje prate promjene brzine v_s po dubini.

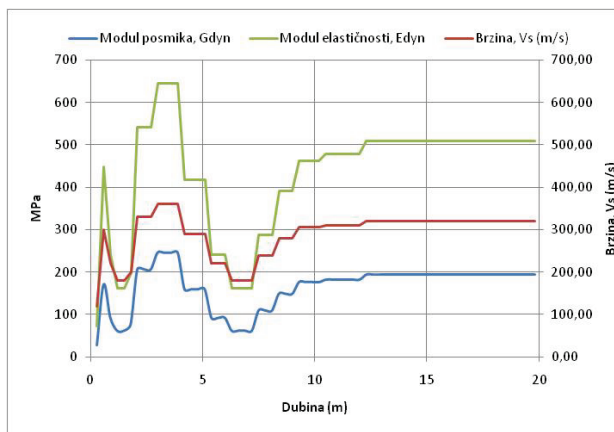
Dinamičke konstante elastičnosti G_{dyn} i E_{dyn} se mogu izračunati iz poznate brzine posmičnih valova V_s i gustoće ρ prema izrazima iz teorije elastičnosti (5) i (6). Model tla definiran kao model seizmičke sredine poznatih vrijednosti brzina v_s se može zbog toga transformirati u model dinamičkih modula elastičnosti i posmika koji se u tlu mijenjaju po dubini. Slika 23 prikazuje primjer takvog modela tla.

8. ZAKLJUČAK

Površinski Rayleighovi valovi generiraju se na isti način kao i P valovi, a budući da prenose najveći dio energije izvora ($\approx 70\%$), lako se detektiraju.

Tablica 3. Usporedba različitih metoda klasifikacije tla (modificirano prema Anbazhagan, 2014)

OPIS	GEOLOGIJA I GEOMORFOLOGIJA	PENETRACIJA		GEOFIZIČKE METODE		
		SPT	DPH	DOWN-HOLE	SASW	MASW
Utrošeni napor	-	veliki/srednji		veliki	mali	mali
Bušenje	-	nužno/ne		nužno	ne	ne
Cijena	mala	velika/umjerena		velika	mala	umjerena
Trajanje	dugo	dugo/srednje		srednje	kratko	kratko
Kvaliteta podataka	slaba	dobra		vrlo dobra	dovoljna	vrlo dobra
Otkrivanje promjena u sedimentima	slabo	dobro		vrlo dobro	dobro	vrlo dobro
Pogodne vrste tla	sva	nekoherentna		sva	sva	sva
Dubina za mikrozoniranje	slaba	dobra		dobra	dobra	vrlo dobra
Mjerenje dinamičkih svojstava	slabo	dovoljno		dobro	dobro	vrlo dobro
Uspješno izvedenih slučajeva	malo	mnogo		mnogo	mnogo	vrlo mnogo



Slika 23. Funkcijska ovisnost modula posmika i modula elastičnosti o brzinama posmičnih valova

Rezultat interpretacije je brzina širenja posmičnih valova v_s . Ovaj parametar je iznimno važan u geotehnici i inženjerskoj seizmologiji. Vrlo se teško određuje pomoću klasičnih seizmičkih metoda, jer posmične valove nije lako generirati, a zbog seizmičkih smetnji otežano je i pikiranje prvih nailazaka.

Uslojenost tla i debljine slojeva mogu se korektno odrediti SASW i MASW metodama koje se baziraju na analizi površinskih valova. Razlika ovih metoda je u načinu prikupljanja podataka na terenu i načinu njihove obrade. MASW je brža i jednostavnija metoda zbog višekanalnog pristupa kod kojeg nije potrebno mijenjati raspored geofona. Iz istog je skupa mjernih podataka moguća interpretacija brzina P i S valova te 1D, 2D ili

čak 3D profiliranje. MASW interpretacije dubina i debljina slojeva tla ili stijena se uglavnom dobro poklapaju s podacima istražnog bušenja kao i s podacima penetracijskog sondiranja.

Istraživanja opisana u ovom radu su potvrdila da se MASW metoda može jednako uspješno primijeniti za stratificiranje kao i za određivanje dinamičkih svojstava pojedinih slojeva tla u vrlo kratkom vremenu uz minimalne troškove. Zbog svojih prednosti, primjena ove neinvazivne metode posebno je pogodna za geotehnička istraživanja velikog opsega kao što su odlagališta otpada, hidrotehničke građevine, eksploatacijska polja i slično.

Istraživanjem je potvrđena i redefinirana relacija između brzine širenja posmičnih valova i broja udaraca standardnog penetracijskog pokusa u krupnozrnim šljuncima. Na korelaciju u takvim formacijama u znatnoj mjeri utječe postotak valutica većeg promjera. Pojava takvih valutica zamjetno povećava broj udaraca kod svih vrsta dinamičkih sondiranja.

Vrijednosti prosječnih brzina $v_{s,30}$ posmičnih valova u krupnozrnim šljuncima istraživanog područja su bile u intervalu 260÷320 m/s. Prema tome istraživano se područje po Eurokodu 8 klasificira u C kategoriju tla što je u skladu s rezultatima ostalih istraživanja i geološkim opisom lokacija.

Uspješnost primjene penetracijskih i geofizičkih metoda u geotehničkoj praksi prikazuje Tablica 3. MASW metoda ima brojne prednosti u određivanju dinamičkih svojstava tla u odnosu na klasične metode.

9. LITERATURA

ABEM Instruction Manual (1989), Atlas Copco ABEM AB, Švedska.

Anbazhagan P, Probabilistic Approach for Seismic Microzonation - Geotechnical Issues, <<http://www.civil.iisc.ernet.in/~anbazhagan/J-8.pdf>>, 25.12.2009.

Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L (1985) Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics* 50 4, 571-581

Crosshole Seismic Methods Per ASTM Standard, <http://www.microgeo.com/detailed_discussions/dm7.html>, 21.04.2010.

Hanumantharao C, Ramana G V (2008) Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. *Journal of Earth System Science* 117 S2, 719-730

Heisey J S, Stokoe II K H, Meyer A H (1982) Moduli of pavement systems from Spectral Analysis of Surface Waves. *Transp. Res. Rec.* 852, 22-31

HRN EN 1997-2:2008, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 2.dio. Istraživanje i ispitivanje temeljnoga tla (EN 1997-2:2007).

HRN EN 1998-1:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio. Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004).

Luna, R., H. Jadi (2000) Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods, Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis, MO

Park C B, Multichannel analysis of surface waves (MASW), <www.masw.com>, 21.04.2010.

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

Park C B, Miller R D, Xia J (1999) Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64 3, 800-808

Park C B, Miller R D, Xia J (1998) Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *Soc. Explor. Geophys.*, 1377-1380

Premur V, Đurin M, Kaniški M (2004) Izvješće o izradi pijezometara P-7, P-8, P-9 i P-10 pored deponija u Knegincu. Premur d.o.o., Varaždin

Puech A, Rivoallan X, Cherel L, The use of surface waves in the characterisation of seabed sediments: development of a MASW system for offshore applications, Brest, France.

<http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/xlurton/B3_Geotechnics/Puech_2.pdf>, 30.08.2010.

Szavits-Nossan, V., Kovačević, M.S., Szavits-Nossan, A. (1999) Posmična krutost i deformacije tla: novi pogledi, *Gradevinar* 51, 12; 783-792.

Spagnoli G (2008) An empirical correlation between different dynamic penetrometers. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 13 C, 1-11

Stokoe K H II, Wright S G, Bay J A, Roesset JM (1994) Characterization of geotechnical sites by SASW method, in *Geophysical characterization of sites*. Oxford Publishers, New Delhi.

Telford W M, Geldart L P, Sheriff R E, Keys D A (1990) *Applied Geophysics*, 2nd edition, Cambridge Univ. Press., Cambridge.

Zonge International, Inc.: Crosshole Seismic Methods per ASTM Standard, <http://www.microgeo.com/detailed_discussions/dm7.html>, 24.01.2014.

Xia J, Miller R D, Park C B (2000) Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes. *Soc. Expl. Geophys.*, 1295-1298



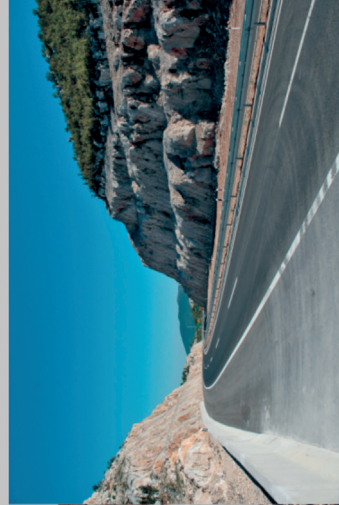
GEOBIM

BUŠENJE I MINIRANJE:

- prometnice
- kamenolomi i široki iskopi
- rušenje objekata
- podmorska miniranja
- ostale potrebe u niskogradnji

GEOMEHANIKA I BUŠENJE:

- bunara
- mikropiloti
- toplinske pumpe
- sidra
- injektiranje





www.gkgrupa.hr



GK GRUPA

IZVOĐAČ GEOTEHNIČKIH KONSTRUKCIJA



GK GRUPA d.o.o.

Miroslava Krleže 1/1
42000 Varaždin
tel. +385 42 208 428
fax. +385 42 208 429

Hallerova aleja 1
42000 Varaždin
tel. +385 42 312 948
fax. +385 42 312 949

info@gkgrupa.hr



 **Agregati**



 **Tvornica betona**



 **Poboljšivači tla**



 **Stočna kreda**



KAMING d.d.

42222 Ljubeščica
Zagorska 1

Centrala: (042) 623 427
Direktor: (042) 623 319
Komerijala: (042) 623 212
Komerijala: (042) 623 865
Telefaks: (042) 623 407

Email: kaming@kaming.hr



Kaming d.d. je certificiran po međunarodno priznatoj normi **ISO 9001:2000**, te njegov sustav upravljanja zadovoljava zahtjevima norme

UPUTE AUTORIMA

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

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

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

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

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

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

Autori dostavljaju rad elektroničkom poštom na e-mail adresu: casopis@gfv.hr. Rad treba biti pripremljen u Microsoft Wordu, na A4 formatu stranice, s marginama od 25mm i proredom 1.5, u jednom stupcu s obostranim poravnanjem. Tekst se piše u

Arial ili Calibri fontu veličine 10pt, a stranice imaju automatsku numeraciju u desnom donjem kutu. Ovisno o sadržaju tekst se dijeli u nekoliko poglavlja čiji naslovi su pisani podebljano veličine 12pt i poravnani ulijevo. Rad se piše u trećem licu jednine i mora biti terminološki usklađen s važećim zakonskim propisima i međunarodnim sustavom jedinica (SI). Sve jednadžbe moraju biti numerirane, a tablice i slikovni prilozi numerirani s naslovom i uključeni na odgovarajuće mjesto u članku. Svi slikovni prilozi (crteži, dijagrami, fotografije) trebaju biti pripremljeni za grafičku reprodukciju s minimalnom rezolucijom od 300 dpi i treba ih dostaviti u zasebnoj mapi.

Prilikom **citiranja radova u tekstu** navode se samo ranije objavljeni radovi. Ako autori smatraju potrebnim, tada se u radu mogu navesti i osobne komunikacije i neobjavljeni radovi, ali na prikladan način kao dio teksta ili u zahvalama na kraju rada.

Popis literature (References) sadrži abecedni popis objavljenih radova citiranih u tekstu. Koristi se Harvardski stil citiranja literature i popisa referenci.

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

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

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

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

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

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

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

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

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

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

Authors should submit their paper by e-mail to: **casopis@gfv.hr**. The paper should be prepared in Microsoft Word in A4 page format, with 25mm margins and 1.5 line spacing, in one column aligned to both sides. The text should be written in 10pt Arial or Calibri, and the pages should have automatic numbering in the bottom right corner. Depending on the content, the text should be divided into several sections whose headings are in 12 pt bold and aligned to the left. The paper should be written in the third person singular and has to be terminologically harmonized with legal regulations in force and the international system of units (SI). All equations have to be numbered; tables and figures should also be numbered with a heading and inserted in the appropriate place in the article. All figures (images, diagrams, photographs) have to be prepared for graphic reproduction at a minimum resolution of 300 dpi and submitted in a separate map.

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

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

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

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