

UDK
62:502/504

ISSN 1849-4714 (Tisak)
ISSN 1849-5079 (Online)



INŽENJERSTVO OKOLIŠA

Scientific and professional journal in the area
of environmental engineering

GEOTEHNIČKI
FAKULTET,
SVEUČILIŠTE U
ZAGREBU
VARAŽDIN,
HRVATSKA



FACULTY OF
GEOTECHNICAL
ENGINEERING,
UNIVERSITY OF
ZAGREB
VARAŽDIN,
CROATIA

GODIŠTE / VOLUME 3
BROJ / NUMBER 2
PROSINAC / DECEMBER 2016

IMPRESSUM

Izdavač/Publisher:

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

Adresa uredništva/Editorial address:

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

Glavni urednik/Editor in Chief:

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec, stjepan.strelec@gfv.hr

Urednički odbor/Editorial board:

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

Tehnički urednici/Technical board:

Doc. dr. sc. Hrvoje Meaški, hmeaski@gfv.hr
Doc. dr. sc. Bojan Đurin
Davor Stanko, mag. phys

Tisak/Printed by:

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

Naklada/Edition:

300 primjeraka/300 copies

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

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

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

ISSN 1849-4714 (Tisak)

ISSN 1849-5079 (Online)

UDK 62:502/504

Naslovna slika / Journal cover photo: Tvrdava Minčeta, Dubrovnik, Hrvatska / Fortress Minčeta, Dubrovnik, Croatia

Poštovano čitateljstvo,

pred vama je novi, šesti broj časopisa Inženjerstvo okoliša s kojim se uspješno završava i treća godina njegovog izlaženja.

U ovom broju i dalje nastojimo održati interdisciplinarnost kao i povezanost s inženjerstvom okoliša kojem teži cijeli sveučilišni studij Geotehničkog fakulteta, ali također i uključiti završene i postojeće studente u znanstveno-istraživački rad na način da objavljuju radove zajedno sa svojim mentorima. Shodno tome, radovi u ovom broju su vezani za glavne smjerove diplomskog sveučilišnog studijskog programa Geotehničkog fakulteta, a u konačnom odabiru je svojevrsna prednost dana onim radovima u kojima su autori i koautori bili studenti.

Tri rada su vezana za problematiku koja se rješava u sklopu geoinženjerstva okoliša:

- Geotehnička istraživanja na tvrđavi „Minčeta“, Dubrovnik, Hrvatska
- Primjeri uporabe šljunčanih pilota za ubrzanje konsolidacije i ojačanje tla
- Odlaganje radioaktivnog otpada

Tri rada su sa svojom tematikom vezana za vodne resurse, odnosno za upravljanjem vodama:

- Crpni sustavi za navodnjavanje (CSN) - usporedba između fotonaponskih i konvencionalnih izvora energije
- Hidrogeološke značajke vodotoka Plitvica na području Plitvičkih jezera, Hrvatska
- Primjena Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti

Dva rada su vezana za energetiku i upravljanje okolišem:

- Renewable energy in Mexico: development and outlook of photovoltaic (PV) energy
- Recikliranje otpadne gume

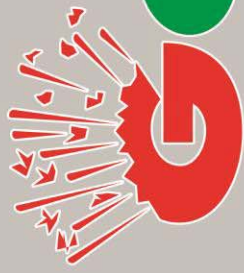
Kako bi održali postignuti kontinuitet izlaženja i u narednim godinama, pozivamo Vas da nam se pridružite sa svojim radovima te unaprijed zahvaljujemo svima koji će časopis INŽENJERSTVO OKOLIŠA prepoznati kao mjesto prezentiranja svojih rezultata istraživanja.

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

Od ovog broja, časopis Inženjerstvo okoliša citiran je u Chemical Abstracts Service Source Index (CASSI) koja nudi bibliografske podatke o publikacijama citiranima u međunarodnoj Chemical Abstract bazi podataka.

Uz želju da nam se sa svojim radovima pridružite u kvalitetnom iskoraku i još boljoj prepoznatljivosti našeg časopisa, želimo Vam čestit Božić te sve najbolje u nastupajućoj 2017. godini.

Uredništvo časopisa Inženjerstvo okoliša



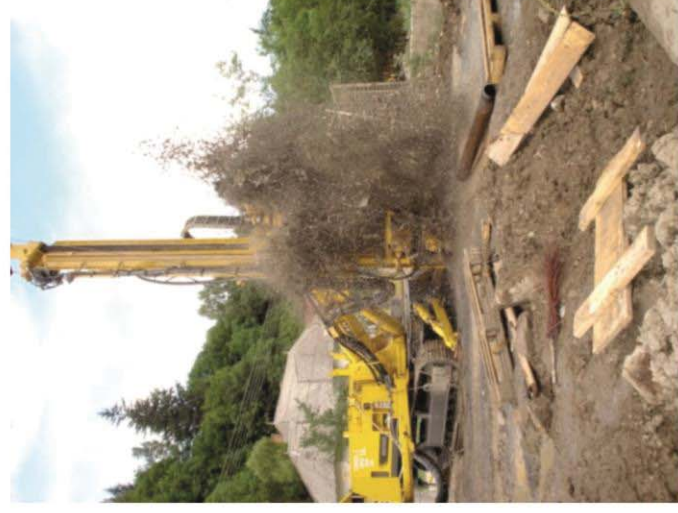
GEOBIM

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



S A D R Ź A J – C O N T E N T

<p>Mohamed EL-Shimy, Mohamed Nour Eldeen, Taha Abdo Mohamed POWERING IRRIGATION WATER PUMPING (IWP) SYSTEMS - COMPARISON BETWEEN PHOTOVOLTAICS AND CONVENTIONAL ENERGY SOURCES CRPNI SUSTAVI ZA NAVODNJAVANJE (CSN) - USPOREDBA IZMEĐU FOTONAPONSKIH I KONVENCIONALNIH IZVORA ENERGIJE</p>	7
<p>Hrvoje Meaški, Marina Marciuš, Anita Ptíček Siročić HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE VODOTOKA PLITVICA NA PODRUČJU PLITVIČKIH JEZERA, HRVATSKA HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE WATERCOURSE PLITVICA IN THE PLITVICE LAKES AREA, CROATIA</p>	21
<p>Matija Bedovec, Kristijan Grabar, Stjepan Strelec PRIMJENA SLUG TESTA U FORMACIJAMA VISOKE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI ANALYSIS OF SLUG TESTS IN FORMATIONS OF HIGH HYDRAULIC CONDUCTIVITY</p>	33
<p>José G. Vargas-Hernández, Mohamed EL-Shimy, Arturo Córdova Rangel, Lucija Nad RENEWABLE ENERGY IN MEXICO: DEVELOPMENT AND OUTLOOK OF PHOTOVOLTAIC (PV) ENERGY OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE U MEKSIKU: RAZVOJ I PRIKAZ FOTONAPONSKE (PV) ENERGIJE</p>	41
<p>Anita Ptíček Siročić, Dario Lonjak, Franjo Florijanić RECIKLIRANJE OTPADNE GUME WASTE RUBBER RECYCLING</p>	49
<p>Lucija Nad, Boris Kavur ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA NUCLEAR WASTE DISPOSAL</p>	53
<p>Kristijan Grabar, Željko Miklin, Stjepan Strelec GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA NA TVRĐAVI „MINČETA“, DUBROVNIK, HRVATSKA GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF THE FORTRESS “MINČETA”, DUBROVNIK, CROATIA</p>	63
<p>Vitković Valentino, Ivandić Krešo PRIMJERI UPORABE ŠLJUNČANIH PILOTA ZA UBRZANJE KONSOLIDACIJE I OJAČANJE TLA REVIEWS OF STONE COLUMNS APPLICATION FOR CONSOLIDATION ACCELERATION AND SOIL IMPROVEMENT</p>	73

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

IRRIGATION WATER PUMPING (IWP) SYSTEMS - COMPARISON BETWEEN PHOTOVOLTAICS AND CONVENTIONAL ENERGY SOURCES

CRPNI SUSTAVI ZA NAVODNJAVANJE (CSN) - USPOREDBA IZMEĐU FOTONAPONSKIH I KONVENCIONALNIH IZVORA ENERGIJE

Mohamed EL-Shimy ^{1*}, Mohamed Nour Eldeen ², Taha Abdo Mohamed ³

¹ Ain Shams University, Electrical power and machines department, Cairo, Egypt

² Ain Shams University, Irrigation engineering department, Cairo, Egypt

³ SunInfinite Co, Cairo, Egypt

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: mohamed_bekhet@eng.asu.edu.eg

Sažetak: U radu je prikazana detaljna tehno-ekonomska analiza te analiza emisija stakleničkih plinova (SP) konvencionalnih i solarnih (FN) energetskih izvora energije za crpne sustave za navodnjavanje (CSN). Ključni čimbenici koji utječu na ekonomske karakteristike solarne fotonaponske izvore energije uključuju dimenzije, postupke za usmjeravanje sustava za praćenje kretanja Sunca, te karakteristike proizvodnje (osobito učinkovitosti) solarne-FN tehnologije. Stoga, ovaj rad opisuje dimenzioniranje i optimizaciju praćenja smjera kretanja Sunca za CSN s obzirom na utjecaj različitih FN tehnologija na natapni i "kap po kap" sustav za navodnjavanje. Ekonomske karakteristike i emisije solarnih PV izvora također su prikazani u usporedbi sa konvencionalnim sustavima s obzirom na stvarne troškove proizvodnje energije. Prikazani su poboljšani modeli za proizvodnju energije, dimenzioniranje, određivanje ekonomskih karakteristika i emisija SP. Prikazani CSN, smješten na lokaciji New Kalbsha u regiji Lake Nasser na jugu Egipta, razmatran je kao primjer za uspoređivanje solarnih FN i konvencionalnih izvora energije za CSN. Rezultati pokazuju visoku održivost izvora solarne FN energije za CSN u usporedbi sa distribucijskom električnom mrežom i varijantom sa dizel motorom. **Ključne riječi:** crpljenje vode za navodnjavanje, solarni fotonaponski sustavi, dizel motori, električna mreža, analiza održivosti.

Abstract: This paper presents a detailed techno-economic and greenhouse gasses (GHG) emissions analysis of conventional and solar-PV energy sources for supplying irrigation water pumping (IWP) systems. The key factors affecting the economics of solar-PV energy sources include the size, the sun tracking algorithm, and the energy production characteristics (especially the efficiency) of the solar-PV technologies. Therefore, this paper presents sizing and sun tracking optimization of solar-PV generator for IWP systems considering the impact of various solar-PV technologies for the flood and drip irrigation systems. The economics and emissions of solar-PV sources in comparison with conventional systems are also presented considering the true costs of energy production. Improved models for energy production, sizing, economics and GHG emissions quantification are presented. A proposed IWP project located at the New Kalbsha site near the Lake Nasser region in the south of Egypt is considered as a numerical example for the comparative analysis of solar-PV and conventional energy sources for IWP. The results show the high viability of solar-PV sources for IWP in comparison with the utility grid electricity and diesel engine energy alternatives.

Keywords: irrigation water pumping, solar photovoltaics, diesel engines, electricity grid, viability analysis.

Received: 08.10.2016 / Accepted: 29.11.2016

Published online: 14.12.2016

Znanstveni rad / Scientific paper

1. INTRODUCTION

Conventionally either diesel engines or motor-pump set supplied from the grid electricity are used for Irrigation Water Pumping (IWP); however, the use of these energy sources faces some problems. These problems are associated with the environmental impact, energy supply feasibility, and energy source availability. Generally, both diesel engines and grid electricity are based on fossil fuels. Therefore, they have negative ecological impacts and highly affected by the variable costs of these fuels. With respect to the grid access, it is not economically feasible and technically reliable to extent the electricity grid for covering the energy demand required for irrigation in remote locations. This is due to the low energy and intermittent demand of these types of electrical loads. In addition, supplying these remote locations by diesel fuels may be

faced by high transportation costs and risks of fuel unavailability. The problems associated with conventional energy sources open the path to the utilization of renewable energy sources in many applications including IWP. Due to its natural availability, static technologies, and competitive economics, solar photovoltaics (solar-PV) are the most attractive energy alternative in the field of IWP (Lal et al. 2013; Qoaider et al. 2010). Solar-PV systems can also be constructed in any scale starting from micro-scale to large-scale (EL-Shimy et al. 2016; EL-Shimy 2013; Hamidat et al. 2003; Ghoneim 2006). This makes the possibility to perfectly adapt the design of the solar-PV generators to the scale of the considered load.

Since irrigation loads are considered deferrable (i.e. loads that can be shifted in time), the natural variability

and intermittency of the solar energy source do not create a technical challenge (EL-Shimy et al. 2016; EL-Shimy 2013; EL-Shimy May 2015). In addition, neither electrical nor electrochemical energy storage is generally required in IWP applications; however, water storage tanks may be needed in some IWP applications based on the characteristics of the irrigation loads (EL-Shimy et al. 2016; EL-Shimy Nov 2015).

From an economic point of view, solar-PV generating systems have high initial costs but their operation and maintenance (O&M) costs are generally very low in comparison with their conventional counterparts as well as other renewable energy sources (EL-Shimy 2012; EL-Shimy 2009; Said et al. 2015; Cloutier 2011). The proper sizing and sun tracking algorithm of solar-PV generators also play a key factor in the economics and the LCOE of these systems. Therefore, this paper presents a systematic method for sizing and sun tracking optimization of solar-PV energy systems. It popular to declare that the Levelized Cost of Energy (LCOE) of solar-PV systems is generally high in comparison with the retail prices of the grid electricity or most of the other conventional counterparts. These economical characteristics are based only on the consideration of the direct costs of energy sources; however, energy sources can be characterized by direct and indirect (or external) costs (Burtraw 2012; Sundqvist 2002).

The true costs of energy include the direct and indirect costs. The indirect costs include the costs associated with health and environmental damages caused by emitting pollutions. The factors that affect the value of the true costs include the population density near a power plant, emitted pollutions, and sustainability. In this paper, the impact of considering the true costs of energy on the economic feasibility and the LCOE of conventional and solar-PV energy alternatives for supplying IWP are investigated. The presented sizing optimization method is based on (EL-Shimy 2013); however, the impacts of various sun tracking options and various available solar-PV technologies on the sizing and economics are considered in this paper. References (Said et al. 2015; EL-Shimy et al. 2016) presented a detailed overview of various solar-PV technologies and sun tracking options as well as their

costs. These data is used as input data in this paper. This paper considered also two of the most utilized irrigation approaches. These are the flood and drip irrigation systems. Energy production, economic, and emissions models are presented. The techno-economic and emissions analysis of a proposed large scale irrigation water pumping project is presented as a numerical example. This project is located at the New Kalbsha site near the Lake Nasser region in the south of Egypt. The meteorological conditions and the proposed hydraulic energy demand are available in (EL-Shimy 2013).

2. SOLAR-PV IWP SYSTEM CONFIGURATION AND ENERGY FLOW MODELING

Normally, a solar-PV water pumping system consists of three main components: the solar-PV generator, motor and the pump. Each component has its own operating characteristics, which are the I-V characteristics of the PV array, the power consumption-discharge characteristics of the pump and the torque-speed characteristics of the motor and pump as well. The motor drives the pump whose torque requirements vary with the speed at which it is driven. The motor is operated by the generated power from the solar-PV array whose I-V characteristics depend nonlinearly on the solar irradiance variations and on the temperature of the solar-PV cells and also on the current drawn by the motor (Ghoneim 2006). The solar-PV generator consists of an array of solar-PV modules connected in series-parallel combinations to provide the desired DC voltage and current (Hamidat 2008).

A schematic diagram of the system configuration chosen for the present study is presented in Fig. 1. The main system components are: solar-PV array, maximum power point tracker (MPPT), power conditioning device (P.C.D), motor, and pump. The MPPT is adopted here to force the solar-PV array to work at its maximum power, thus improving the system efficiency.

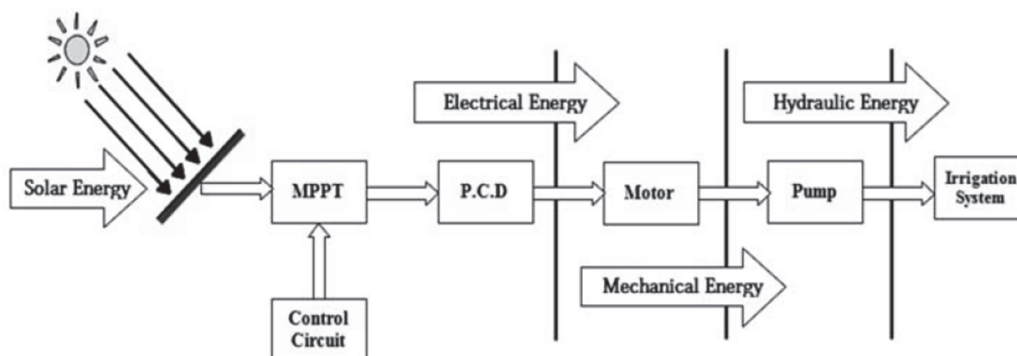


Figure 1. A schematic diagram of the considered solar-PV pumping system for IWT

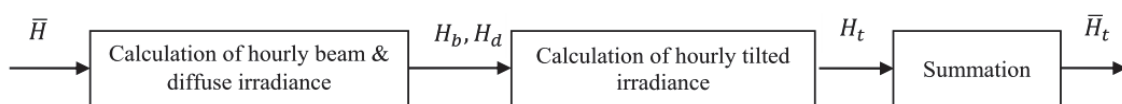


Figure 2. Model of the solar energy incident on the solar-PV plane

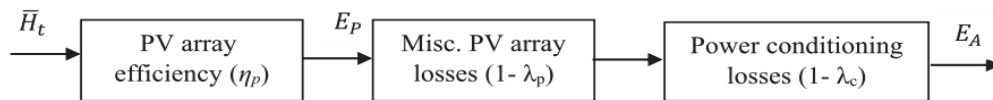


Figure 3. Solar-array energy production model

Two types of pumps are used in the solar-PV pumping systems: (i) centrifugal pumps which are the most common pumps used in the solar-PV pumping applications and (ii) volumetric pumps. The power conditioning device (P.C.D) has a role to optimize the transfer of the energy between the solar-PV array and the motor-pump set. Power conditioning can be a DC/AC inverter for an AC electric motor or a DC/DC converter for a DC electric motor (Hamidat 2008). It is clear from Fig. 1 that there are four main energies flowing in the solar-PV pumping system starting from the solar energy that received on the surface of the solar-PV modules which is converted instantaneously into electric energy by the solar-PV effect, then the motor that is responsible for the electrical energy conversion into mechanical energy and finally the pump that is responsible for the mechanical energy conversion into hydraulic energy needed for the operation of the specified irrigation system. All the components of the solar-PV pumping system are modeled independently and integrated together for the purpose of performance and sizing optimization.

Solar irradiance on a generally titled plane of the solar-PV array is computed using the following algorithm shown in Fig. 2. Details of the mathematical modeling of various blocks in Fig. 2 are available in (EL-Shimy 2013). The flowchart can be described as a series of three basic steps: The total daily irradiance in the plane of the solar-PV array \bar{H}_t equals the summation of the hourly irradiance in the plane of the solar-PV array H_t , that is $\bar{H}_t = \sum H_t$. The estimation of H_t involves the determination of the hourly beam H_b (or direct) and diffuse H_d irradiance on a horizontal surface for all hours of an average day (i.e. having the same daily global irradiance as the monthly average global irradiance). The monthly average value of daily global irradiance is simply obtained by taking the arithmetic mean of daily values by dividing the monthly global irradiance value (sum of daily values) by the number of days in the corresponding month (EL-Shimy 2013; Duffie et al. 2013; RETScreen 2004; NASA 2016).

A solar-PV cell is a nonlinear power source, the output current and voltage depend on the irradiance level and temperature. Any change in the weather conditions results in a change in the operating point of the solar-PV cell. The solar-PV array model can be represented through the following flowchart shown in Fig. 3. The equations describing the energy production model of Fig. 3 are available in (RETScreen 2004).

The electrical energy generated from the solar-PV has major problems such as the energy conversion efficiency is low, especially under low irradiance conditions, and the amount of generated electric power changes continuously with weather conditions. Thus it becomes necessary to use techniques to extract the maximum power, to achieve maximum efficiency in operation. Connecting a solar-PV module directly to the load enables extraction of 31%

energy, which increases to 97% through the use of MPPT. The maximum power extracted from solar-PV cells depends not only on the solar irradiance strength but also on the operating point of the energy conversion system (Faranda et al. 2008).

In general, there is a unique point on the I-V or P-V curve, called the Maximum Power Point (MPP), at which the entire solar-PV system operates with maximum efficiency and produces its maximum output power as shown in Fig. 4; this point varies according to the climatic conditions (EL-Shimy Nov 2015; De Brito et al. 2011; Faranda et al. 2008). Fig. 4 clearly shows that the short circuit current and the MPP are proportional to the solar irradiance. The changes in the solar irradiance have a minor impact on the open circuit voltage. On the other hand, the changes in the cell temperature cause inverse changes in the open circuit voltage and the MPP while their impacts on the short-circuit current are minor. This is due to the inverse relation between the temperature and the efficiency of the solar-PV cells.

The supply of an AC motor by a solar generator in a solar-PV water pumping system requires the use of an inverter which can transform the DC voltage produced by the solar-PV into an AC source. In principle, there are two main types of DC/AC inverters: the self-commutated and the forced-commutated inverter (Duzat et al. 2000; Daud et al. 2005). Generally, the efficiency of the inverter η_i indicates the fraction of the input DC power P_{DC} that is transferred to the output AC side P_{AC} . The inverter efficiency ranges from 95-98% and is defined as the ratio between its output AC power P_{AC} to its input power P_{DC} i.e. $\eta_i = P_{AC}/P_{DC}$. Although there are several alternative motor technologies for the use in IWP (Gopal 2013), the squirrel cage induction motors are considered the perfect choice for modern IWP systems. This is due to the rigidity, low maintenance requirements, long lifetime and low cost of these motors in comparison with other alternatives. The efficiency of an induction motors related to the mechanical power (P_{mech}) furnished to the load and given by $\eta_m = P_{mech}/P_{AC}$. The full load efficiency of induction motors varies from about 85-97 %.

Water pump market offers a variety of configurations, each of which has its fields of applications and features and it may be subdivided into three main types according to their applications: submersible, surface, and floating water pumps. There are another classification of pumps according to their principle of operation such as centrifugal pumps, screw pumps, and piston pumps (RETScreen 2004; Ramos et al. 2009). The selection of an appropriate pump in a solar-PV water pumping application is solely site dependent factors such as water requirement, water height, and water quality (EL-Shimy 2013; RETScreen 2004). The head versus flow rate (Q) usually characterizes the different types of pumps. The 'head' is a term refers to the height of a vertical column of water. The total dynamic

head (H_T) of a pump (or total pumping head) is the sum of the total static head, the pressure head, the friction head, and the velocity head (Bachus et al. 2003).

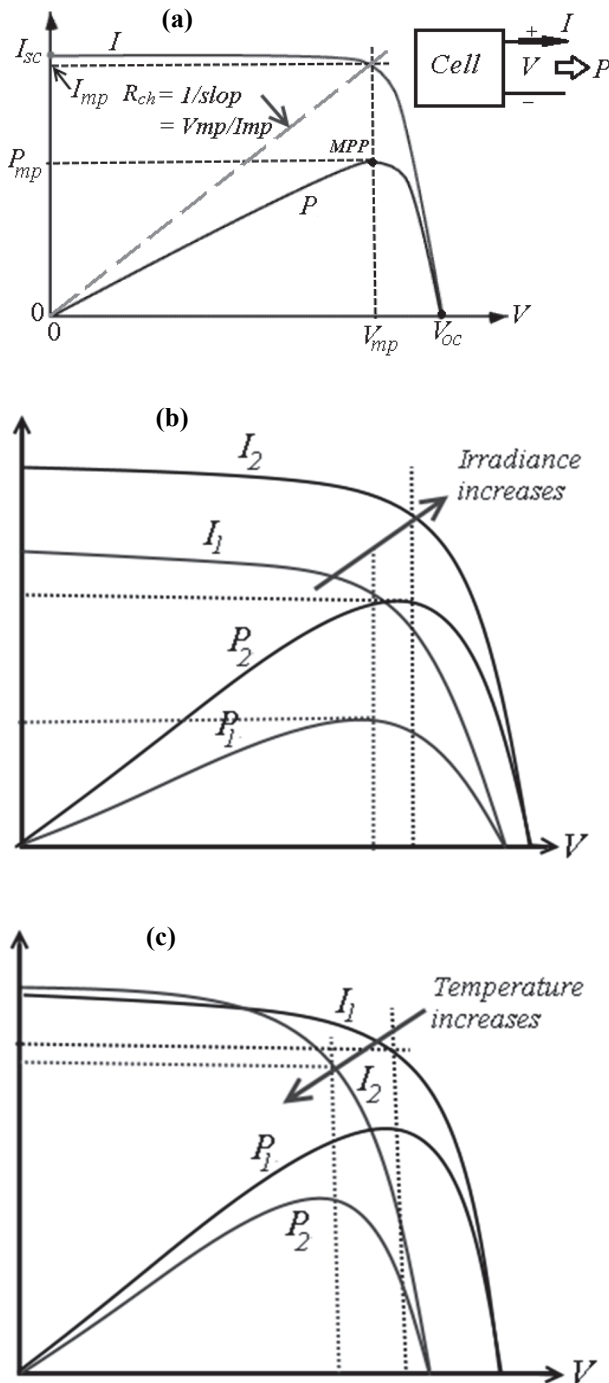


Figure 4. A typical curve characteristic of a solar-PV cell (EL-Shimy Nov 2015).
 (a) I-V and P-V characteristics of a solar-PV cell;
 (b) Impact of irradiance variations;
 (c) Impact of temperature variations

The centrifugal pump, for example, can be characterized by its absorptive power which is obviously the mechanical power on the shaft coupled to the pump and is given by (Daud et al. 2005) $P_p = \rho g Q H_T$ and the pump efficiency is defined as the ratio of the hydraulic power imparted

by the pump to the fluid to the shaft mechanical power i.e. $\eta_p = P_p / P_{mech}$. The selection of the right pump for a specific discharge rate and a definite head is usually performed via the use of the performance curves issued usually by the pump manufacturers. For a constant flow rate, the higher the pumping head the higher should be the stages number of pump and of course the associated input power. Practically, for a definite head, maximum efficiency of the centrifugal pump varies according to the flow rate in the range from 50 to 72%.

Irrigation distribution systems should have the capability to deliver and apply the amount of water needed by the crop in the appropriate time duration. The present study will focus on the most commonly used systems in Egypt which is the *flood* and *drip* irrigation distribution systems. In the surface irrigation system (*flood*), water is applied directly to the soil surface from a channel located at the upper reach of the field. Two general important requirements to obtain high efficiency in surface methods of irrigation are properly constructed water distribution systems to provide adequate control of water to the fields and proper land preparation to permit uniform distribution of water over the field (Ross et al. 1997). The micro-irrigation, also known as *trickle* or *drip* irrigation, is an irrigation method which minimizes the use of water and fertilizer by allowing water to drip slowly to the roots of plants, either onto the soil surface or directly onto the root zone. This system is used in place of water scarcity as it minimizes conventional losses like deep percolation, evaporation and run-off.

It should be noted that the main feature of *flood* irrigation is the high water discharge with low pressure on the contrary the *drip* irrigation which is featured by low discharge with a high pressure. The technique of drip irrigation in comparison with flood irrigation only wets a fraction of the soil, so that the value of the evaporation from the soil will be smaller and there will be a saving in water use. However, there will also be a greater level of transpiration as there is a greater heating of the surface (and hence of the air above it) as only a fraction of the soil is wet, so that the soil will emit more long-wave infrared irradiance. Part of this irradiance is captured by the leaves of the plant, leading to an increase in transpiration, nevertheless, the net balance of evapo-transpiration is clearly favorable to drip irrigation, especially if the plants are young and broadly space (Cuadros et al. 2004).

3. SUN TRACKING OPTIONS AND TILT ANGLE

The amount of electrical energy obtained from solar-PV systems is directly proportional to the intensity of the sunlight which falls on the solar-PV modules. For this reason it is desired that the solar-PV panels be fixed in a way that they feasibly face the sun or that they have a system which tracks the sun. The best way to collect the maximum solar energy and therefore electrical output power is by using solar tracking devices; a solar-PV systems with an appropriate sun tracking can collect 30-40% more energy than without sun tracking (Taghvaei et al. 2013).

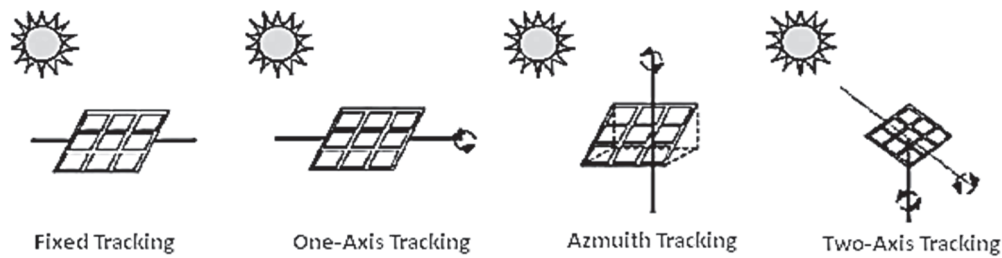


Figure 5. Types of sun tracking devices (RETScreen 2004)

A solar tracker device is a mechanical device supporting the solar collector and follows the direction of the sun on its daily sweep across the sky in a prescribed way. This is to minimize the angle of incidence of beam irradiance on the solar collector; however, the trackers are expensive, need energy for their operation and are not always can be applied. Therefore, the optimal selection of a sun tracking option is highly dependent on the coordinates of the considered site and economic feasibility of using it (Said et al. 2015). Sun tracker devices as shown in Fig. 5 may be classified into “one-axis tracker” that track the sun by rotating around an axis located in the plane of the collector. The axis can have any orientation, but is usually horizontal east-west, horizontal north-south, or parallel to the earth's axis; “azimuth tracker” that have a fixed slope and rotate about a vertical axis; and “two-axis tracker” that always position their surface normal to the beams of the sun by rotating about two axes (RETScreen 2004).

4. SYSTEM SIZING APPROACH

The required nominal power of the solar-PV pumping system used for irrigation application is usually determined by the hydraulic energy calculation, mainly based on water demand calculated by agricultural experts, total head lift of water, monthly average daily solar irradiance values. The equation for nominal electric power of solar-PV generator or Watt peak P_{el} expressed in (W), under Standard Test Conditions (STC), according to Kenna & Gillett (Kenna et al. 1985)

$$P_{el} = \frac{1000}{f_m [1 - \alpha_c (T_c - T_o)] \eta_{MP}} \frac{E_H}{E_S} \quad (1)$$

where E_H is the output hydraulic energy (Wh/day), E_S is the input solar energy at the solar-PV generator (Wh/day), f_m is the load matching factor to characteristics of the solar-PV generator, α_c is the solar-PV cell temperature coefficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), T_o is the reference temperature of the cell (25 $^{\circ}\text{C}$), η_{MP} is the motor-pump unit efficiency, and T_c is temperature of the cell ($^{\circ}\text{C}$).

Based on eq. (1), the nominal electric power of solar-PV generator is calculated based on the known monthly average daily demand for hydraulic energy E_H and available monthly average daily solar irradiance E_S in the critical month (i.e. the month in which the ratio between hydraulic and radiated solar energy (E_H/E_S) is maximum) and the known efficiency of the motor-pump unit η_{MP} in reference operating conditions.

However, this approach has the following flaws:

- 1- The effect of solar-PV-generator tilt or tracking on its nominal capacity is absent.
- 2- By monitoring only the critical month, it is not possible to observe properly the demands for hydraulic energy in the other months. Furthermore, it is completely ignored that the water static level and water quantity can vary from month to month, thus affecting the determining of critical values.
- 3- Irrigation is considered a deferrable load because they can be supplied during any time of the day and not during specific hours. Therefore, the daily simulation of a solar-PV pumping system instead of hourly simulation would be sufficient. Subsequently, the use of the total daily irradiance in the plane of the solar-PV generator \bar{H}_t instead of the monthly mean daily irradiance on the horizontal plane E_S in Eq. (1) will result in a better estimation of the solar energy at the input of the solar-PV generator.

In the present approach of determining the optimal nominal electric power of the solar-PV generator, Eq. (1) is transformed, in order to show its direct dependency on pumped water and to include characteristics of the subsystem components, as well as irrigation method. In this approach, the initial equation is the one for calculating hydraulic energy at the output of a pumping system. A pumping system demand is defined as the product of the depth from which the water is raised and the required daily flow. The daily hydraulic energy, E_H , required to pump a volume Q to a specified head H , is

$$E_H = \frac{\rho g Q H}{3600} \quad (2)$$

where E_H is expressed in (W h/day), ρ is the density of water (1000 kg/m³), g is the acceleration due to gravity (9.81 m/sec²), Q the total daily flow of water (m³/day) and H the total pumping head.

If the water source is a well then the total pumping head H can be expressed by (Narvarte et al. 2000),

$$H = H_{0T} + H_{ST} + \frac{H_{DT} - H_{ST}}{Q_{max}} Q_{AP} + H_F(Q_{AP}) \quad (3)$$

where, $Q_{AP} = \sigma Q_d$; H is the total pumping head (m), H_{0T} is the vertical head from the water outlet to the ground (m), H_{DT} is the dynamic level of water in borehole (m), H_{ST} is

the static level (groundwater level) (m), Q_{max} is the maximum discharge capacity of well (m³/h), Q_{AP} is the average flow rate, known as “apparent flow” (m³/h), H_F is the head friction loss (m), Q_d is the mean daily quantity of pumped water (m³/day), and σ is the calculation coefficient of the average flow rate.

Furthermore, with modern solar-PV pumping systems, which are mostly electronically controlled (AC-motor-based solar-PV pumping systems), instead of matching factor f_m in Eq. (1), it is justified to use inverter efficiency η_I , which can include efficiency of the entire electronic system for matching the load power to the characteristics of solar-PV generator. In addition, miscellaneous solar-PV-generator losses, including solar-PV-array wiring losses, should be included. A rough estimate of these miscellaneous losses is 4% (EL-Shimy 2013; Glasnovic et al. 2007). Taking into account the losses such as: the fraction of the day in which solar irradiance is above the threshold at which the pump starts to work ($G_d > G_{thres}$); the yield of the photovoltaic generator η_{PV} , the yield of the AC/DC inverter η_I , and the yield of the motor-pump unit η_{MP} . The hydraulic energy demand E_H is then determined according to the plant water requirements, the irrigation method, and the total pumping head:

$$E_H = \frac{\rho g Q H}{3600 \eta_N \eta_F} \quad (4)$$

According to the irrigation method utilized, two efficiency factors should be included in the determination of the hydraulic energy demand. The first factor is the irrigation efficiency η_N that shows to what extent the water entering an irrigation system is exploited. The trickle (drip) irrigation method exhibits highest irrigation efficiency of 85%, while the flood irrigation method is characterized by lowest irrigation efficiency ranging from 40-50%. The irrigation efficiencies of the open-channel and sprinkle irrigation methods are 50–60% and 70%, respectively. The second factor is the efficiency of the irrigation system η_F to account for the frictional energy losses in the irrigation system. A rough estimate of these frictional energy losses is 10% (EL-Shimy 2013). The nominal electric power of the solar-PV generator or peak Watt P_{el} is then modified to be

$$P_{el} = \frac{\rho g Q H}{3600 \bar{H}_t [1 - \alpha_c (T_c - T_o)] \eta_{MP} \eta_N \eta_F \eta_W \eta_I} \quad (5)$$

Taking into account the power losses when the panels working at temperatures above the standard temperature 25°C. These may be taken to be approximately 10% of the nominal electric power of solar-PV generator P_{el} (Cuadros et al. 2004). The required peak solar-PV power P (kWp) will then be

$$P = 1.1 P_{el} \quad (6)$$

The actual monthly mean produced energy available for water pumping in (KWh/day) E_A is given by (EL-Shimy 2013):

$$E_A = A \eta_{MP} \eta_r \eta_W \eta_I \bar{H}_t [1 - \alpha_c (T_{cell} - T_o)] \quad (7)$$

where, A is the overall area of the solar-PV generator given by ($A = m * s$), s is the area of solar-PV module, η_r is the solar-PV module efficiency at a reference temperature, and η_W is the miscellaneous solar-PV-array losses (wiring losses). The number of solar-PV modules m is defined by ($m = P^*_{el} / P_{Module}$) which should be approximated to the nearest highest integer number and P^*_{el} is the optimal nominal electric power of the solar-PV generator.

The actual pumped total daily water flow Q_{pumped} in (m³/day) can be determined by:

$$Q_{pumped} = \frac{3600 E_A \eta_N \eta_F}{\rho g H} \quad (8)$$

The overall efficiency of the solar-PV water pumping system can be determined by:

$$\eta_A = \eta_{MP} \eta_N \eta_F \eta_W \eta_I \eta_r [1 - \alpha_c (T_{cell} - T_o)] \quad (9)$$

Although the given sizing model seems simple, it is not easy to size the solar-PV pumping system to produce the expected hydraulic energy in every time stage, because the produced hydraulic energy from solar-PV pumping system depends on radiated solar energy in that period. Due to this, this work defines the objective function in a new way, i.e., by optimizing the relation between the output hydraulic energy and the input produced energy. The minimization of the objective function in this work results in finding the nominal electric power of the solar-PV generator which would, in the observed period, meet the consumers' demands in the best way possible. This will be described in the upcoming sections of this paper.

5. LEVELIZED COST OF ENERGY (LCOE)

It should be noted that, an economic feasibility study conducted for a certain location at particular time may not be applicable for another location and at another time. Generally, the economic feasibility of an energy production project can be evaluated using several metrics (EL-Shimy 2013; El-Shimy 2012; Branker et al. 2011). One of these metrics is the cost per watt, but this method does not consider the effects of the lifetime, performance of the energy producing equipment, and the financial policies. The levelized cost of energy (LCOE) is another popular metric which is a cost of producing energy (usually electricity) for a particular system. Therefore, it fairly compares the energy costs produced by different systems, and it allows alternative technologies to be compared when different scales of operation, investment or operating time periods exist. The LCOE is the net present value of the unit-cost of electricity over the lifetime of a generating technology. It is often taken as a representation for the average price that the generating technology must receive in a market to break even over its lifetime. The LCOE captures capital costs, ongoing system-related costs and fuel costs- along with the amount of electricity produced- and converts them into a common metric: \$/kWh.

Details about the mathematical modeling of the LCOE is available in (Said et al. 2015); however, generally, the LCOE can be defined by

$$LCOE = \frac{\text{Total Life Cycle Cost (TLCC)}}{\text{Total Lifetime Energy Production}} \quad (10)$$

6. THE TRUE COST OF ELECTRICITY GENERATION TECHNOLOGIES

In the energy markets across the world, market prices for fossil fuels are often lower than the prices of energy generated from renewable sources, such as solar, and wind. These market prices, however, don't consider the "true costs" of the energy being sold, because they ignore the external costs to society caused by pollution and its resulting problems, including damages to public health and the environment (Burtraw et al. 2012). **Table 1** illustrates that this metric ignores the huge variation in external cost estimates due to their sensitivity to the presence of multidimensional components of external damages. Median values might be a better indication of central tendency than mean values because they do not allow outliers to influence the measure.

7. GREEN HOUSE GASES (GHG) ANALYSIS

Among the available software for analysis of renewable energy technologies, the powerful freeware *RETScreen* Clean Energy Project Analysis version 4.0 software is used in this study to perform the Green House Gases (GHG) emission reduction analysis. The *RETScreen* software is capable of estimating the amount of greenhouse gases (GHG) which could be avoided as a result of usage of renewable energy sources. It determines the greenhouse gas emission reduction (mitigation) potential for a Base

Case System (Baseline), and for the Proposed Case System (Clean Energy Project). This GHG emission reduction analysis worksheet contains four main sections: Background Information, Base Case System (Baseline), Proposed Case System (Project) and GHG Emission Reduction Summary. The results are calculated as equivalent tonnes of CO₂ avoided per annum (El-Shimy 2009; RETScreen 2004).

The model indicates the global warming potential (GWP) of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). GWPs have been assigned to greenhouse gases to allow for comparisons of their relative heat-trapping effect. The higher the GWP of a gas the greater the contribution to the greenhouse effect (RETScreen 2004). GWPs of gases are describes the influence of a GHG in comparison to carbon dioxide (CO₂), which is assigned a GWP of 1, (i.e., the GWP of CH₄ is 21 means that a ton of methane is considered to cause 21 times more global warming than a ton of carbon dioxide and the GWP of N₂O is 310 means that a ton of nitrous oxide is considered to cause 310 times more global warming than a ton of carbon dioxide). The default values are defined by International Panel on Climate Change (IPCC) (Sundqvist et al. 2002).

In the present work, the engine driven pump with diesel as the fuel type and grid extension with oil as the fuel type were selected as the baseline cases. The default emission factors (i.e. the mass of greenhouse gas emitted per unit of energy and vary for different types and qualities of fuels, and for different types and sizes of power plants) and conversion efficiencies (i.e. the efficiency of energy conversion from primary heat potential to actual useful energy output) of diesel and oil fuel types are given in **Table 2** (Fenhann 1999).

Table 1. Summary of External Cost Estimates from the Literature (Burtraw et al. 2012)

Cents/kWh	Coal	Oil	Natural Gas	Nuclear	Hydro	Wind	Solar	Biomass
Min	0.01	0.04	<0.01	<0.01	0	0	0	0
Max.	90.61	53.43	17.69	86.23	35.14	1.18	2.94	29.56
Mean	18.75	16.48	6.17	9.53	4.50	0.41	1.12	6.62
Median	8.54	12.19	3.51	1.08	0.43	0.43	1.02	3.59

Table 2. Default emission factors and conversion efficiency of various fuels (Fenhann 1999)

Fuel type/ Source	CO ₂ emission factor e_{CO_2} (Kg/Gj)	CH ₄ emission factor e_{CH_4} (Kg/Gj)	N ₂ O emission factor e_{N_2O} (Kg/Gj)	Fuel conversion efficiency η (%)
Diesel	74.10	0.0020	0.0020	30
Oil	77.40	0.0030	0.0020	30
solar-PV	00.00	0.0000	0.0000	43

In the *RETScreen* software, in case of the "Grid extension" is the baseline power source, it is often reasonable to assume that an oil fired power plant is the proxy plant, with "oil" is the fuel type with a 100% fuel mix and the default Transmission and Distribution "T & D" losses is 15% which includes all energy losses between the power plant and the end-user. In addition, for "Water pumping" (where the fuel conversion efficiency equals the solar-PV pump system efficiency) is assumed to be 43% (RETScreen 2004).

8. METHODOLOGY

A flowchart for the sizing evaluation is given in **Fig. 6**. Extensive analysis of the meteorological conditions of the study site is performed to ensure the compatibility of the site's characteristics with the Standard Operating Conditions (SOC) required by the all the solar-PV modules listed in *RETScreen* software database. An appropriate solar correlation model for the specific site is determined. To ensure the capability of the generated energy, the sizing

decision is based on the simulation of the solar-PV pumping system over the whole year. The optimal sizing is evaluated by comparing the monthly average hydraulic energy demand and the actual monthly average produced energy available for water pumping.

An optimally sized solar-PV pumping system will be able to supply the required hydraulic energy for all the months of the year. Therefore, the optimal capacity of an optimally tilted solar-PV generator P_{el}^* is determined by the following equation:

$$P_{el}^* = \max (P_{el}(i)), \quad (11)$$

where, $i = 1, 2, 3, \dots, 12$ is the number of the month such that $i = 1$ for January and $i = 12$ for December.

The governing constraints that, if satisfied, indicate an optimally sized solar-PV water pumping system are:

$$\left. \begin{aligned} E_A(i) - E_H(i) &\geq 0 \\ \max(E_A(i)) - \max(E_H(i)) &\cong 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

These constraints can be used to evaluate the optimal sizing of the solar-PV. In eq. 12, the first constraint is an inequality constraint, which is included to ensure the sufficiency of the solar-PV generator to supply the demanded monthly mean hydraulic energy for all months. The satisfaction of the second constraint prevents over-sizing of the

solar-PV generator (EL-Shimy 2013). In order to conduct an economic feasibility analysis for renewable energy projects, initial costs, periodic costs, and financial parameters are required as inputs. Since, it is internationally agreed that large value of uncertainty are associated with these parameters; however, the input economical parameters used in this paper are obtained from literature such as energy cost escalation rate, interest rate, inflation rate, discount rate, etc are summarized in Table 3.

Table 3. Summary of various financial parameters used in this study

Item description	Value
Inflation rate	10.96%
Real discount rate	9.25%
Annual debt interest rate	8.75%

The subsidies and incentives for solar-PV systems include tax rebates, grants, feed-in tariffs, net metering and Renewable Energy Certificates (RECs). Since subsidies and incentives are complex and widely variant, they are not considered in the present study. Income taxes and credits are not considered in this study. The omission of these economic items will also result in safe viability analysis results and conclusions.

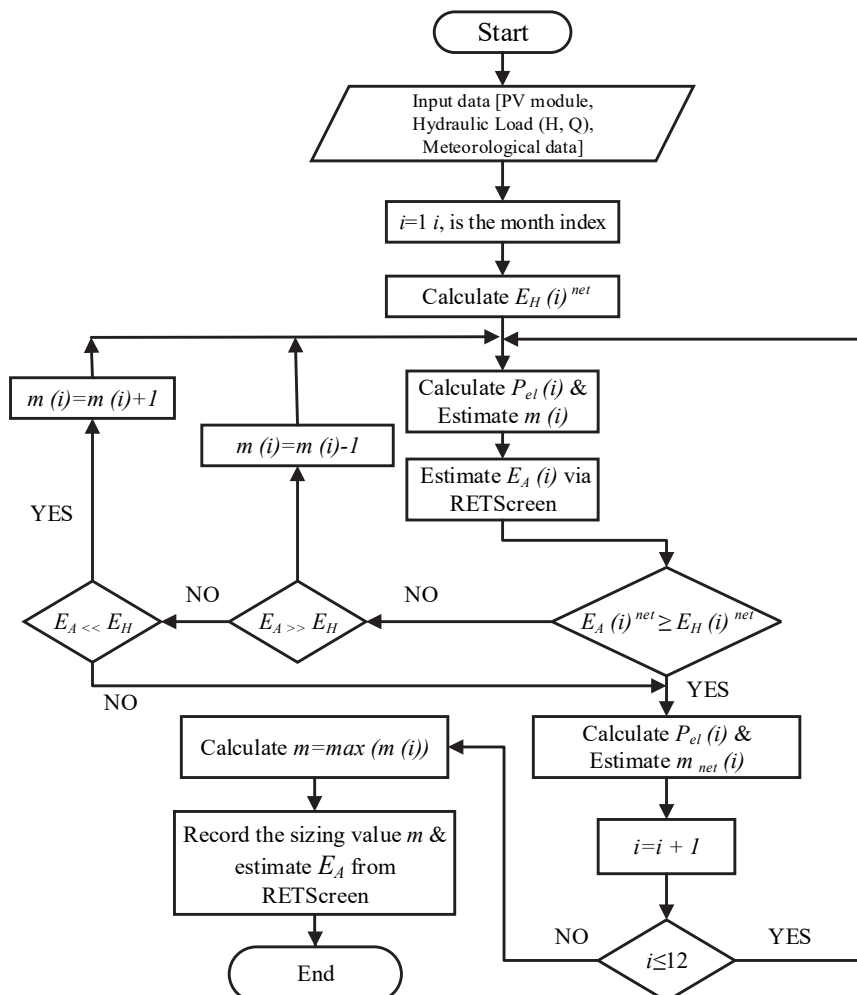


Figure 6. A flowchart for the sizing evaluation.

Table 4. Electricity tariff prices for agriculture sector in Egypt.

Fiscal year	2008/2009	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019
Tariff PT/kWh	11.20	17.00	22.00	27.10	33.40	41.10
Escalation rate %	N/A	51.79	29.41	23.18	23.25	23.05

In order to calculate the power rating for the appropriate engine to drive the pump, P_{Engine} the following equation can be used

$$P_{Engine} = \frac{P_p}{F} \quad (13)$$

where F is the load factor of the engine which will be assumed by 80 % and P_p is the power required by the pump/motor which can be determined by (Muselli et al. 1999)

$$P_p = \frac{\rho g h Q}{\eta_{mp}} \quad (14)$$

where Q is the maximum volumetric flow rate in m^3/sec , ρ is the density of water in Kg/m^3 , g is the gravitational constant in m/sec^2 , h is the total dynamic head in meters, and η_{mp} is the pump/motor efficiency which is assumed to be 43%.

The capital cost of the diesel engine is then estimated using,

$$C_{Engine} = \$234.23 P_{Engine} + \$3400 \quad (15)$$

Eq. (15) is based on generator dealer pricing (Brighton CO 2016; Caterpillar Inventory 2016). Prices are assumed to include the cost of the associated control electronics. An installation cost of 10% of the retail price is assumed. The total capital cost of the diesel generator system, C_{Engine} is then given by,

$$C_{Total} = 1.1 C_{Engine} \quad (16)$$

In order to calculate the required diesel fuel consumption, the Specific Fuel Consumption (SFC) should be estimated. The SFC includes the efficiency of both the source and pump, expressed in L_{Fuel}/L_{Water} , it allows specifying the value of fuel liters needed per liter of pumped water. The SFC can be estimated by the following equation (RETScreen 2004),

$$SFC = \frac{9.81 \times H}{J \times \eta_{engine} \times \eta_{pump}} \quad (17)$$

where, H is the total head (m), J is the energy content of fuel (38.7 MJ/L), η_{engine} is the engine efficiency = 80% and η_{pump} is the pump efficiency which is assumed to be 65%.

The diesel engine poses additional running costs resulting from the intensive operation, monitoring and maintenance requirements. The diesel system contains air, fuel, oil, and water separator filters that require replacement. Lubrication oil and coolant need to be

replaced periodically. Therefore, a diesel engine should be continuously a subject for intensive monitoring and maintenance. Frequent damages for diesel engine occur. Consequently, a considerable stock of spare parts should be available on-site. Additionally, oil should be changed every 250 operating hours and a complete overhaul should be conducted every 15,000 operating hours (Muselli et al. 1999). The annual O&M costs of a diesel engine are considered to have about 15% of the capital costs and the lifetime of the engine is assumed to be 13 years (Qoaider et al. 2010).

The utility electricity prices differ according to the consumer class (i.e. residential, commercial, industrial and agriculture etc.) and the voltage level of the power supply (i.e. low voltage, medium voltage, high voltage etc.). Each class or voltage level has its own price. In Egypt, a tiered retail electricity-pricing scheme is used. The tariff is converted to (US\$ cents/kWh). In 2008, the electricity tariff for agriculture application, that is connected mainly to the low voltage network 380 V, was 11.2 PT/kWh which increased to 17 PT/kWh in July 2014 according to the cabinet decree No. 1257 year 2014, which decided that the electricity tariff will be increased gradually over the next five years starting from the fiscal year 2014 to 2018 in a move to liberate the electricity market as it is still subsidized as shown in Table 4 (EgyptERA 2016).

For this analysis proposed here, price escalation rate after Fiscal year 2018/2019 is assumed to be 23 % per year.

The meteorological conditions and the proposed hydraulic energy demand are available in (EL-Shimy 2013). Fig. 7 compares the demanded hydraulic energy in case of a flood and drip irrigation system. It should be mentioned that the used irrigation efficiency for flood and drip systems which is necessary to calculate the hydraulic energy demand is 45% and 85% respectively.

The highest hydraulic energy demand, as shown in Fig. 7, occurs in June, July and August months, independent of the irrigation methods, like the daily solar irradiance on a horizontal surface at which the highest irradiances are in June, July and August months (summer months), this reveals that the highest irrigation water demand that occurs in summer months meet the highest solar irradiances which make the solar-PV powered water pumping is an excellent choice. The demanded hydraulic energy values in case of drip irrigation system is lower than those values in case of flood system with about 52.94 % for all the months. This indicates that the drip irrigation system is an energy saving system rather than the flood one.

9. RESULTS

9.1 Optimal tilt angle

For determining the optimal sun tracking type and the optimal tilt angle, two stages are performed. In the first

stage, the optimal tracking type (fixed, one-axis, and two-axis) is determined by comparing the output energy with various tracking options and the optimal option is selected based on the highest output energy. In the second stage, the optimal time based tilt angle (annual, monthly, and seasonally) is determined by comparing the output energy for the different solar-PV technologies for the optimal sun tracking type. Tables 5-7 summarize the comparison of the output energy of the different tracking types in case of annual, monthly, and seasonally time based respectively. The tables also show the values of the energy production from the modules considering two situations. The first one is horizontally placed solar-PV module $\beta = 0$, while the second situation is module with the optimal theoretical tilt angle (which is $\beta = \psi - \delta = 23.33^\circ$) where ψ is the latitude of the site and δ is the declination angle.

It is clear from Table 5 that, for any solar-PV technology, the output energy of the estimated and theoretical annual fixed angle and annual one-axis is the same. The

output energy of the annual two-axis tracking type is higher than the estimated and theoretical annual one-axis by a value does not exceed 4% (2.96%, 3.04%, 3.16%, 3.85%, 2.99% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, CIS respectively) and higher than and the annual fixed type by a value exceeding 35% (35.88%, 36.10%, 36.11%, 35.97%, 36.18% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, CIS respectively). In addition, the output energy of the estimated and theoretical annual one-axis is higher than the estimated and theoretical annual fixed tracking type by a value exceeding 30% (31.97%, 32.09%, 31.94%, 30.94%, 32.24% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, and CIS respectively). Taking into consideration the high cost of the two-axis tracking type and the small output energy difference with the one-axis tracking type, it should be concluded that the annual one-axis is the optimal tracking type.

Table 5. The output energy for different solar-PV modules and for annual based tracking types (MWh/y).

Tracking type		Annual Fixed			Annual One-Axis			Annual Two-Axis
Tilt angle		Estimated (20.4°)	Horizontal (0°)	Theoretical (23.33°)	Estimated (22°)	Horizontal (0°)	Theoretical (23.33°)	
solar-PV tech	Mono-Si	0.588	0.563	0.588	0.776	0.755	0.776	0.799
	poly-Si	0.349	0.334	0.349	0.461	0.448	0.461	0.475
	a-Si	0.288	0.275	0.288	0.380	0.369	0.380	0.392
	CdTe	0.139	0.133	0.139	0.183	0.178	0.182	0.189
	CIS	0.152	0.146	0.152	0.201	0.196	0.201	0.207

Table 6. The output energy for different solar-PV modules and for monthly based tracking types (MWh/y).

Tracking type		Monthly Fixed			Monthly One-Axis			Monthly Two-Axis
Tilt angle		Estimated	Horizontal (0°)	Theoretical	Estimated	Horizontal (0°)	Theoretical	
solar-PV tech	mono-Si	0.621	0.563	0.617	0.794	0.755	0.794	0.799
	poly-Si	0.367	0.335	0.367	0.472	0.447	0.471	0.475
	a-Si	0.303	0.274	0.302	0.391	0.369	0.390	0.392
	CdTe	0.147	0.134	0.146	0.188	0.176	0.186	0.189
	CIS	0.159	0.146	0.160	0.206	0.197	0.206	0.207

Table 7. The output energy for different solar-PV modules and for seasonally based tracking types (MWh/y)

Tracking type		Seasonally Fixed			Seasonally One-Axis			Seasonally Two-Axis
Tilt angle		Estimated	Horizontal (0°)	Theoretical	Estimated	Horizontal (0°)	Theoretical	
solar-PV tech	mono-Si	0.614	0.563	0.612	0.792	0.755	0.791	0.799
	poly-Si	0.366	0.335	0.365	0.470	0.447	0.469	0.475
	a-Si	0.300	0.275	0.300	0.388	0.367	0.388	0.392
	CdTe	0.144	0.132	0.144	0.187	0.176	0.186	0.189
	CIS	0.159	0.146	0.158	0.206	0.197	0.205	0.207

Table 8. The output energy for different solar-PV technology for the time based one-axis tracking type

Output Energy (MWh/y) for one-axis tracking type				
Time segment		Annual	Monthly	Seasonally
solar-PV tech	mono-Si	0.776	0.794	0.792
	poly-Si	0.461	0.472	0.470
	a-Si	0.380	0.391	0.388
	CdTe	0.183	0.188	0.187
	CIS	0.201	0.206	0.206

It is clear from **Table 6** that, for any solar-PV technology the output energy of the estimated and theoretical monthly fixed angle and monthly one-axis is almost the same. The output energy of the monthly two-axis tracking type is higher than the estimated and theoretical monthly one-axis by a value does not exceed 1% (0.63%, 0.64%, 0.26%, 0.53%, 0.49% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, CIS respectively) and higher than the estimated and theoretical monthly fixed type by a value exceeding 28% (28.66%, 29.43%, 29.37%, 28.57%, 30.19% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, CIS respectively). The output energy of the estimated and theoretical monthly one-axis is higher than the estimated and theoretical monthly fixed tracking type by a value exceeding 27% (27.86%, 28.61%, 29.04%, 27.89%, 29.56% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, and CIS respectively). Taking into consideration the high cost of the two-axis tracking type and the small output energy difference with the one-axis tracking type, it should be concluded that the monthly one-axis is the optimal tracking type.

It is clear from **Table 7** that, for any solar-PV technology the output energy of the estimated and theoretical seasonally fixed angle and seasonally one-axis is almost the same. The output energy of the seasonally two-axis tracking type is higher than the estimated and theoretical seasonally one-axis by a value does not exceed 1% (0.88%, 1.06%, 1.03%, 1.07%, 0.49% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, CIS respectively) and higher than the seasonally fixed by a value exceeding 29% (30.13%, 29.78%, 30.67%, 31.25%, 30.19% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, CIS respectively). In addition, the output energy of the estimated

and theoretical seasonally one-axis is higher than the estimated and theoretical seasonally fixed type by a value exceeding 28% (28.99%, 28.42%, 29.33%, 29.86%, 29.56% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, and CIS respectively). Taking into consideration the high cost of the two-axis tracking type and the small output energy difference with the one-axis tracking type, it should be concluded that the seasonally one-axis is the optimal tracking type. In the *Second Stage*, the time based tilt angle (Annual, Monthly, Seasonally) is determined by comparing the output energy for the different solar-PV technologies for the determined optimal tracking type. Table 8 shows the output energy based on the estimated tilt angle only for the optimal tracking type (one-axis) as it is slightly higher than in case of the theoretical angle.

It is depicted from **Table 8** that the output energy in case of the monthly based tilt angle is higher than in case of seasonally based tilt angle by 0.25%, 0.43%, 0.77%, 0.53, 0% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, CIS solar-PV modules respectively. While the output energy in case of the seasonally based tilt angle is higher than the annual based tilt angle by 2.06%, 1.95%, 2.11%, 2.19%, 2.40% for mono-Si, Poly-Si, a-Si, CdTe, CIS modules respectively. Therefore the seasonally based tilt angle for the one-axis tracking type is the optimum choice.

9.2. Optimal sizing of the solar-PV generator

Tables 9 - 12 show the results based on the seasonally based tilt angle for the one-axis tracking type as chosen the optimum choice.

Table 9: The number of solar-PV module (m) of the solar-PV generator

Sizing Parameter	Number of modules – m; seasonal one-axis tracking											
	mono-Si-SPR 320E-WHT			poly-Si-CS6A 190W		a-Si- SN2-145.0W		CdTe- AB1-72		CIS- SL1-85W		
Irrigation method	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip		
Winter												
Jan	Feb	Mar	35,393	18,739	59,609	31,560	73,479	38,904	151,364	80,140	136,316	72,172
Spring												
Apr	May	Jun	44,871	23,748	75,572	39,996	89,422	47,338	187,531	99,249	174,662	92,438
Summer												
Jul	Aug	Sep	48,503	25,688	81,689	43,264	96,719	51,225	202,763	107,388	188,706	99,943
Autumn												
Oct	Nov	Dec	35,893	18,995	60,451	31,990	75,658	40,038	154,791	81,914	137,666	72,852

Table 10: The total collector area (S) of solar-PV generator

Sizing Parameter	Overall area – S (m ²); seasonal one-axis tracking											
	mono-Si-SPR 320E-WHT			poly-Si-CS6A 190W		a-Si- SN2-145.0W		CdTe- AB1-72		CIS- SL1-85W		
Irrigation method	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip		
Winter												
Jan	Feb	Mar	57,337	30,357	77,492	41,028	130,793	69,249	108,983	57,701	102,237	54,129
Spring												
Apr	May	Jun	72,691	38,472	98,244	51,995	159,171	84,262	135,029	71,459	130,997	69,326
Summer												
Jul	Aug	Sep	78,575	41,615	106,196	56,243	172,160	91,180.5	108,982	57,701	141,530	74,957
Autumn												
Oct	Nov	Dec	58,147	30,772	78,586	41,587	134,671	71,268	135,022	71,459	103,250	54,639

Table 11: The nominal electric power (P_{el}) of the solar-PV generator

Sizing Parameter solar-PV Type & Model	P_{el} (MWp); seasonal one-axis tracking											
	mono-Si-SPR 320E- WHT		poly-Si-CS6A 190W		a-Si- SN2- 145.0W		CdTe- AB1-72		CIS- SL1- 85W			
Irrigation method	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip		
Winter												
Jan	Feb	Mar	11.33	6.00	11.33	6.00	10.65	5.64	10.90	5.77	11.59	6.13
Spring												
Apr	May	Jun	14.36	7.60	14.36	7.60	12.97	6.86	13.50	7.15	14.85	7.86
Summer												
Jul	Aug	Sep	15.52	8.22	15.52	8.22	10.65	5.64	14.60	7.73	16.04	8.50
Autumn												
Oct	Nov	Dec	11.49	6.08	11.49	6.08	12.97	6.86	11.14	5.90	11.70	6.19

Table 12: The monthly mean available produced energy (E_A) of the solar-PV generator

Sizing Parameter solar-PV Type & Model	E_A (MWh/month); seasonal one-axis tracking											
	mono-Si-SPR 320E- WHT		poly-Si-CS6A- 190W		a-Si- SN2- 145.0W		CdTe- AB1-72		CIS- SL1- 85W			
Irrigation method	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip	Flood	Drip		
Winter												
Jan	Feb	Mar	8,657	4,585	8,657	4,585	8,199	4,343	8,397	4,447	8,780	4,651
Spring												
Apr	May	Jun	10,678	5,655	10,678	5,655	10,578	5,602	10,621	5,625	10,702	5,668
Summer												
Jul	Aug	Sep	10,262	5,435	10,262	5,435	10,254	5,431	10,257	5,433	10,262	5,436
Autumn												
Oct	Nov	Dec	7,752	4,106	7,752	4,106	7,430	3,935	7,570	4,009	7,846	4,155

It is clear from **Tables 9 - 12**, for the one-axis seasonally based tracking type, the used number of solar-PV modules and its collector area in case of drip irrigation method is lower than the flood irrigation case by almost 47.06 % for all solar-PV technologies. It is also clear that the P_{el} of solar-PV modules in case of drip irrigation method is lower than the flood irrigation case by almost 47.06 %. On the same manner, the E_A at the maximum number of solar-PV modules in case of drip irrigation method is lower than the flood irrigation case by almost 47.04 %.

The results also show that the minimum number of the required modules and the minimum collector area is associated with the mono-Si technology considering the mono-Si-SPR 320E-WHT module. On the other hand, the minimum nominal electric power is associated with the thin film technology of the a-Si- SN2-145.0W modules while the maximum available energy is associated with the thin film technology of the CIS- SL1-85W modules. Therefore, the crystalline solar-PV technologies offer low collector area in comparison with the thin film technologies but the thin film technologies offer higher energy. In this paper, the maximization of the land use saving is assumed to be significantly important. Therefore, the mono-Si-SPR 320E-WHT modules are considered in the construction of the solar-PV generator and the subsequent analysis.

9.3. LCOE results

Considering the true cost of energy, the LCOE is estimated for various energy alternatives i.e. solar-PV, diesel engine, and grid electricity. It is found that the LCOE of solar-PV driven pump is 0.071, 0.070, 0.069 and 0.067 (\$/KWh) for debt ratios (DR) of 100%, 75%, 50% and 0% respectively. It is also found that the LCOE of Engine driven pump is 0.220, 0.217, 0.215 and 0.210 (\$/kWh) for DR of 100%, 75%, 50% and 0% respectively. The LCOE of grid electricity driven pump is found to be 0.193 (\$/kWh). The results show that the solar-PV is the most economical energy source followed by the grid electricity then the diesel engine.

9.4. Green House Gases (GHG) analysis

Fig. 8 shows the GHG analysis results. As expected, the results show that the solar-PV generator is the most environmental friendly energy alternative followed by the diesel engine then the grid electricity.

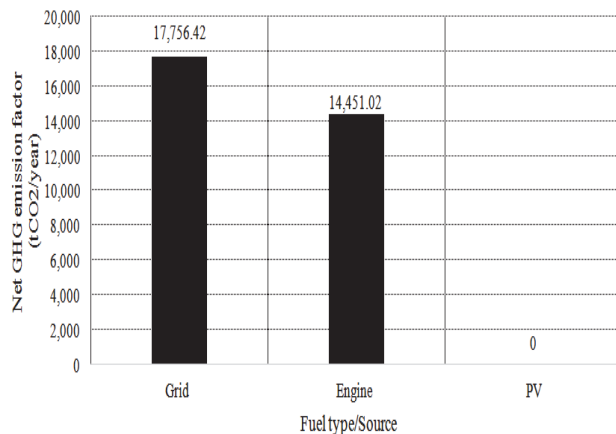


Fig. 8: Net GHG emission factors for various energy alternatives

10. CONCLUSIONS

This paper presented an improved modeling and viability analysis for optimal sizing and performance analysis of solar-PV sources for irrigation water pumping (IWP) systems considering various solar-PV technologies as well as various sun tracking options. Other traditional alternatives for powering IWP systems are considered and compared with the solar-PV alternative. The considered traditional sources are the diesel engines and the utility grid electricity.

The results show that the one-axis sun tracking is the most feasible alternatives as it provides an energy production gain comparable with the two-axis tracking while its cost is relatively low in comparison with the two-axis tracking. The energy production gain with the seasonally tilted one-axis tracking is significantly high in comparison with the fixed modules. From solar-PV technological points of view, the results show that the optimally selected crystalline solar-PV technologies offer low collector area in comparison with the thin film technologies but the thin film technologies offer higher energy production. From economical point of view, the LCOE estimations show that the solar-PV is the most economical energy source followed by the grid electricity then the diesel engine. In addition, the GHG analysis shows that the solar-PV generator is the most environmental friendly energy alternative followed by the diesel engine then the grid electricity.

12. REFERENCES

Bachus L, Custodio A. Know and Understand Centrifugal Pumps: Elsevier Science; 2003.

Branker K, Pathak M, Pearce JM. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2011;15(9):4470-82.

Brighton CO. [cited 2016 June 1, 2016]; Available from: <http://www.dieselserviceandsupply.com/New-Generators/>.

Burtraw D, Krupnick A, Sampson G, Beasley B. The true cost of electric power. RFF Report, Resources for the Future, Washington, DC [online][cit 0111 2013] Available at: <http://www.rff.org/RFF/Documents/RFF-Rpt-BurtrawKrupnick%20TrueCosts.pdf>. 2012.

Caterpillar Inventory. Express generators power suppliers. 2016; Available from: <http://www.expressgenerators.com/inventory.html>.

Cloutier M, Rowley P. The feasibility of renewable energy sources for pumping clean water in sub-Saharan Africa: A case study for Central Nigeria. *Renewable Energy*. 2011;36(8):2220-6.

Cuadros F, López-Rodríguez F, Marcos A, Coello J. A procedure to size solar-powered irrigation (photoirrigation) schemes. *Solar energy*. 2004;76(4):465-73.

Daud A-K, Mahmoud MM. Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests. *Renewable Energy*. 2005;30(5):701-14.

De Brito MA, Sampaio LP, Luigi G, e Melo GA, Canesin CA. Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications. *Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2011 International Conference on: IEEE; 2011. p. 99-104.

Duffie JA, Beckman WA. *Solar Engineering of Thermal Processes*: Wiley; 2013.

Duzat M, Siqueira Rmd. Analytical and experimental investigation of photovoltaic pumping systems: Universität Oldenburg; 2000.

EgyptERA. Electricity Tariffs, Egypt 2014. Cairo: Egyptian Electric Utility and Consumer Protection Regulatory Agency EgyptERA; 2016; Available from: <http://egyptera.org/en/t3reefa.aspx>.

El-Shimy M. Viability analysis of PV power plants in Egypt. *Renewable Energy*. 2009;34(10):2187-96.

El-Shimy M. Analysis of Levelized Cost of Energy (LCOE) and grid parity for utility-scale photovoltaic generation systems. 15th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'12); Dec. 23-25, 2012; Cairo, Egypt: IEEE; 2012. p. 1-7.

El-Shimy M. Sizing optimisation of stand-alone photovoltaic generators for irrigation water pumping systems. *International Journal of Sustainable Energy*. 2013;32(5):333-50.

EL-Shimy M. Dynamic Security of Interconnected Electric Power Systems: Omniscryptum GmbH & Company Kg.; May, 2015.

EL-Shimy M. Dynamic Security of Interconnected Electric Power Systems - Volume 2: Dynamics and Stability of Conventional and Renewable Energy Systems: LAP Lambert Academic Publishing; Nov, 2015.

EL-Shimy M, Abdo T. PV Technologies: History, Technological Advances, and Characterization. In: Anwar S, editor. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology* Taylor & Francis - CRC Press; 2015.

EL-Shimy M, Durin B. Techno-Economic Evaluation and Sizing Optimization of Solar-PV and Wind Energy Sources for Irrigation Water Pumping. The international congress of energy and environment 2016; Opatija, Croatia 2016.

Faranda R, Leva S. A Comparative Study of MPPT techniques for PV Systems. 7th WSEAS International Conference on Application of Electrical Engineering (AEE'08); Trondheim, Norway 2008. p. 100-5.

Fenhann JV. Projections of emissions of greenhouse gases, ozone precursors and sulphur dioxide from Danish sources until 2012: *Energystyrelsen*; 1999.

Ghoneim A. Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems. *Energy conversion and management*. 2006;47(11):1449-63.

Glasnovic Z, Margeta J. A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Solar energy*. 2007;81(7):904-16.

Gopal C, Mohanraj M, Chandramohan P, Chandrasekar P. Renewable energy source water pumping systems—A literature review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013;25:351-70.

Hamidat A, Benyoucef B. Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems. *Renewable Energy*. 2008;33(5):933-42.

Hamidat A, Benyoucef B, Hartani T. Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. *Renewable Energy*. 2003;28(7):1081-96.

Kenna J, Gillett WB. *Solar Water Pumping: A Handbook: Intermediate Technology Publications*; 1985.

Lal S, Kumar P, Rajora R. Techno-economic analysis of solar photovoltaic based submersible water pumping system for rural areas of an Indian state Rajasthan. *Science Journal of Energy Engineering*. 2013;1(1):1-4.

Muselli M, Notton G, Louche A. Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management. *Solar energy*. 1999;65(3):143-57.

Muselli M, Notton G, Louche A. Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management. *Solar energy*. 1999;65(3):143-57.

Narvarte L, Lorenzo E, Caamaño E. PV pumping analytical design and characteristics of boreholes. *Solar energy*. 2000;68(1):49-56.

NASA. Surface meteorology and Solar Energy. USA: NASA; 2016 [cited 2016 10/5/2016]; Available from: <http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

Pande P, Singh A, Ansari S, Vyas S, Dave B. Design development and testing of a solar PV pump based drip system for orchards. *Renewable Energy*. 2003;28(3):385-96.

Qoaider L, Steinbrecht D. Photovoltaic systems: a cost competitive option to supply energy to off-grid agricultural communities in arid regions. *Applied Energy*. 2010;87(2):427-35.

Ramos J, Ramos HM. Solar powered pumps to supply water for rural or isolated zones: a case study. *Energy for Sustainable Development*. 2009;13(3):151-8.

RETScreen International. Clean Energy Decision Support Centre. Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Textbook : Photovoltaic Project Analysis Chapter: Minister of Natural Resources Canada; 2004.

Ross E, Hardy L. *National Engineering Handbook: Irrigation guide*: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service; 1997.

Said M, EL-Shimy M, Abdelraheem M. Photovoltaics energy: Improved modeling and analysis of the levelized cost of energy (LCOE) and grid parity–Egypt case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2015;9:37-48.

Sundqvist T, Söderholm P. Valuing the environmental impacts of electricity generation: a critical survey. *The Journal of Energy Literature*. 2002.

Taghvaei M, Radzi M, Moosavain S, Hizam H, Marhaban MH. A current and future study on non-isolated DC–DC converters for photovoltaic applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013;17:216-27.

HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE VODOTOKA PLITVICA NA PODRUČJU PLITVIČKIH JEZERA, HRVATSKA

HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE WATERCOURSE PLITVICA IN THE PLITVICE LAKES AREA, CROATIA

Hrvoje Meški¹, Marina Marcuš, Anita Ptiček Siročić¹

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

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

Sažetak: Rijeka Plitvica se nalazi u sjeverozapadnom dijelu Nacionalnog parka Plitvička jezera. Dužine je oko 4 km, a započinje snažnim krškim vrelom, izvorom Plitvice. Nakon otprilike 900 m toka u rijeku Plitvicu se s lijeve strane ulijeva vodotok Sartuk. Na kraju svog toka rijeka Plitvica se ruši niz 78 m visoku vapnenačku liticu formirajući najveći slap u Republici Hrvatskoj – Veliki slap. U posljednjih 20-ak godina na Velikom slapu su sve izraženiji nedostaci vode, a kao mogući razlog je, osim smanjenja ukupnog protoka na izvoru Plitvice, i gubitak vode duž vodotoka Plitvice. Zbog toga su u radu analizirani dostupni hidrogeološki, hidrološki podaci i hidrokemijski kako bi se utvrdili uzroci velikih gubitaka vode na Velikom slapu za vrijeme sušnih razdoblja. Utvrđeno je da je proces pojave i nastanka sedrenih barijera vrlo dobro vidljiv duž vodotoku Plitvice te da ovaj vodotok hidrogeološki gledano ustvari predstavlja umanjeni sustav Plitvičkih jezera. Proces sedrenja je stalan i za sada neprekinut, a na nekim mjestima i toliko velik da izdiže cijelo korito te dolazi do izlivanja vode u susjedne livade s vrtačama, gdje se za vrijeme sušnih razdoblja u podzemlje gubi najveći dio vode vodotoka Plitvica.

Ključne riječi: Plitvička jezera, hidrogeologija krša, protoci, sedra.

Abstract: The Plitvica River is located in the northwestern part of the Plitvice Lakes National Park. Length of the river is about 4 km, and it starting with the strong karst spring. After about 900 m from the spring, the Plitvica River receives water from the Sartuk stream. At the end, Plitvica River crashes down the 78 m high limestone cliff, forming the largest waterfall in Croatia - Big Waterfall. In the last 20 years on the Big Waterfall are growing disadvantages of water. A possible reason is, besides reducing of the total amount of water at the source of Plitvice, also loss of water along the watercourse of the Plitvica River. Therefore, in the paper were analysed available hydrogeological, hydrological and hydrochemical data in order to identify the causes of large losses of water at the Big Waterfall during dry periods. It was found out that the process of occurrence and the formation of tufa barriers are very well visible along the watercourse of the Plitvica River, and that this watercourse, hydrogeological looking, is a smaller version of the Plitvice Lakes system. The process of tufa is continuous and uninterrupted for the time being, and in some places so large that rises riverbed what causes a spill of water in the adjoining meadows with sinkholes where during dry periods in underground loses most of the water watercourse Plitvice.

Keywords: Plitvice Lakes, Karst hydrogeology, water flow, tufa sediments

Received: 04.11.2016 / Accepted: 06.12.2016

Published online: 14.12.2016

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Vodotok Plitvica se nalazi u sjeverozapadnom dijelu Nacionalnog parka Plitvička jezera (**slika 1**).

Plitvička jezera nalaze se u zaleđu Velebita na nadmorskoj visini između 400 i 1300 m. Smještena su u istočnoj Lici između planine Male Kapele i Ličke Plješivice. Veći dio nacionalnog parka Plitvičkih jezera smješten je na području Ličko-senjske (90,7%), a manji na području Karlovačke županije (9,3%).

Zbog neprocjenjive prirodne ljepote, ali i brojnih biljnih i životinjskih vrsta, područje Plitvičkih jezera proglašeno je nacionalnim parkom 1949. godine, a UNESCO je 1979. godine Nacionalni park Plitvička jezera uvrstio na popis Svjetske prirodne baštine. Prvotne granice nacionalnog parka proširene su 1997. godine na današnju površinu od 296,85 km².

Dužina vodotoka Plitvica je oko 4 km. Započinje snažnim krškim vrelom, izvorom Plitvice, smještenim

ispod strmih stijena u blizini zaseoka Rodić Poljana na visini od 606 m n. m. Nakon otprilike 900 m toka u vodotok Plitvicu se s lijeve strane ulijeva njen najznačajniji pritok – vodotok Sartuk. Na kraju svog toka vodotok Plitvica se „ruši“ niz 78 m visoku vapnenačku liticu formirajući najveći slap u Republici Hrvatskoj – Veliki slap. Vode iz vodotoka Plitvice i vode iz jezerskoga sustava Plitvičkih jezera spajaju se u depresiji, približno kružnog oblika i promjera otprilike 150 m, zvanog Sastavci. To je ujedno i izvorišno područje rijeke Korane koja se kod Karlovca ulijeva u rijeku Kupu.

U posljednjih 20-ak godina na Velikom slapu su iz godine u godinu sve izraženiji nedostaci vode, a koji se uvijek poklapaju sa sušnijim razdobljima. Jedan od mogućih razloga je, osim smanjenja ukupnog protoka na izvoru Plitvice, i gubitak vode duž vodotoka Plitvica, s

obzirom da su ovi gubici zapaženi već i ranije. Naime, prva hidrološka mjerenja na vodotoku Plitvica provedena su još 1979. s kontinuitetom do 1987. godine upravo zbog uočenih gubitaka vode u vodotoku Plitvica (Sumina, 1988).

Zbog toga je cilj rada bio analizirati dostupne podatke vezane za vodotok Plitvicu i vodotok Sartuk te probati utvrditi hidrogeološke uzroke gdje i zašto dolazi do tako velikih gubitaka vode na Velikom slapu za vrijeme sušnih razdoblja.

Pretpostavke su dodatno provjerene koristeći rezultate hidroloških mjerenja na vodotocima Plitvici i Sartuku, dobivene od strane DHMZ-a za razdoblje od 2001. do 2012. godine. Izvršena je i procjena količine istjecanja na izvoru Plitvice, a rezultati su uspoređeni i s analizom hidrokemijskih mjerenja koja su se provodila na izvoru Plitvice, vodotoku Sartuk i vodotoku Plitvice iznad Velikog slapa u razdoblju od 2005. do 2008. godine.



Slika 1. Položaj Nacionalnog parka Plitvičkih jezera

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Područje Plitvičkih jezera bilo je oduvijek interesantno brojnim istraživačima i znanstvenicima. Kao najstarije, spominje se analiza vode s ušća rijeke Korane u Kupu iz 1897. godine u knjizi prirodoslovca Franjića (1910), što je s podacima Janečka u istoj knjizi označilo početak mjerenja u slivu Korane. Limnolog Gavazzi (1904, 1919) je ukazao na utjecaj klimatskih promjena pri formiranju sedrenih barijera dok je Koch (1916, 1926) proučavao naslage koje su karakteristične za šire područje Plitvičkih jezera i dao pregled hidroloških prilika. Svoja detaljna opažanja je prikazao na Geološkoj karti Plitvice u mjerilu 1:75 000. Ujedno je dao i osvrt na postanak Plitvičkih jezera za koje smatra da su tektonskog postanka.

Geomorfološka istraživanja Plitvičkih jezera provodio je i Roglić (1951, 1974). On je utvrdio da su velika zaravnjena područja na topivim karbonatnim stijenama vezana uz korozivne procese, koji su različito modificirani

klimatskim utjecajima, dok riječnu eroziju kao temeljni proces njihovog postanka potpuno isključuje. Hidrogeologiju područja među prvima opisuje Petrik (1958) koji je sustavno istraživao jezerski sustav i koji je formiranje jezerskog sustava vezivao za tektonske pokrete za vrijeme laramijske faze Alpske orogeneze. Emili (1958, 1965) je radio hidrobiološka istraživanja, Iveković (1958) je pisao o mijenjanju kemijskog sastava vode na Plitvičkim jezerima. Geologijom se bavio Polšak (1959), hidrometeorologijom Makjanić (1958), biodinamikom Pevalek (1958), geotektonikom Herak (1962), a hidrogeografijom Riđanović (1976) i dr.

Božičević (1969, 1971, 1973, 1991) se u više navrata bavio hidrološkim odnosima na Plitvičkim jezerima te u svojim radovima često opisuje speleološke pojave i ukazuje na potrebu njihove zaštite i uključivanja u turističku ponudu. Biondić (1982) u sklopu doktorske disertacije izdvaja slivove na području Like, koji su djelom obuhvaćali i područje Plitvičkih jezera.

Dešković i suradnici (1981, 1984) su vršili hidrološka i hidrokemijska istraživanja i trasiranja podzemnih tokova s ciljem pronalaska podzemnih vodenih veza na području Plitvičkih jezera u svrhu određivanja granica Nacionalnog parka „Plitvička jezera“. Srebrenović (1982) obrađuje hidrološke uvjete za ostvarenje umjetnog jezera (akumulacije) na rijeci Korani u blizini mjesta Selište i određuje karakteristične hidrološke veličine sliva i bilancu rijeke Korane do predviđenog mjesta akumulacije.

Istraživači instituta Ruđer Bošković iz Zagreba, Srdoč i Horvatinčić (1985), proučavali su procese taloženja kalcita na sedrenim barijerama i u jezerskim sedimentima te utvrdili znatno brži rast sedrenih barijera u odnosu na taloženje jezerskog sedimenta. Sumina (1988) uz opažanja vodostaja i povremenih mjerenja protoka pojedinih vodotoka na području Plitvičkih jezera ukazuje na mjesta mogućih gubitaka vode u površinskim vodotocima, posebice u vodotoku Plitvica i u početnom dijelu toka rijeke Korane do Koranskog mosta, a Zaninović i suradnici (1986) te Poje (1989) daju pregled klimatskih značajki Nacionalnog parka Plitvičkih jezera. Stilinović i suradnici (1985, 1989, 2004) istraživali su ekološko stanje Plitvičkih jezera s posebnim osvrtom na bakteriološko stanje jezerskih voda. Obelić i suradnici (2000) vrše fizikalno-kemijska i izotopna istraživanja vode i sedre u Nacionalnom parku Plitvička jezera, a detaljnom analizom jezgri sedimenata dužine 40-ak centimetara uzetih s dna odabranih jezera i utvrđuju starost izvađenog sedimenta u rasponu od 100 do 200 godina.

Žugaj (2003) u sklopu regionalne hidrološke analize protoka u krškom području Republike Hrvatske u razdoblju od 1951. do 1995. godine izračunava karakteristične parametre srednjih godišnjih protoka i za pojedine dijelove sliva rijeke Korane. Biondić i Barbalčić (2004) u sklopu analize velikih voda u crnomorskom dijelu sliva Republike Hrvatske također izračunavaju srednje protoke za pojedine dijelove sliva rijeke Korane. Babinka (2007) u svojoj disertaciji, prikazujući kemijski i izotopni sastav vode i jezerskog sedimenta s područja Plitvičkih jezera, s posebnim osvrtom na antropogeni utjecaj, a Barešić (2009) na temelju provedenih analiza antropogenog utjecaja na jezerski sustav u svojoj disertaciji opisuje primjenu izotopnih i geokemijskih metoda na Plitvičkim jezerima.

Biondić i suradnici (2008) objavljuju rezultate opsežnih hidrogeoloških i hidrogeokemijskih istraživanja područja Plitvičkih jezera. Istraživanja su se provodila u sklopu međunarodnog projekta, a u suradnji, Znanstvenostručnog centra "Ivo Pevalek" NP Plitvička jezera, Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu te Joanneum Research instituta iz Graza, Austrija. Vurnek i suradnici (2010) temeljem analize hidroloških uvjeta i rezultata trogodišnjeg opažanja kvalitete vode Plitvičkih jezera. Meški (2011) u doktorskom radu prikazuje hidrogeološke, hidrološke i hidrogeokemijske značajke sliva Plitvičkih jezera te daje model istraživanja i cjelovite zaštite krških vodnih resursa u zaštićenim prirodnim područjima. Meški i suradnici (2014, 2016) predlažu podjelu sliva Plitvičkih jezera na manje podslivove koji su vezani za glavne izvore i za jezerski sustav Plitvičkih jezera. Jedan od manjih slivova je upravo i sliv Plitvice (slika 2). Novija istraživanja na području nizvodno od Plitvičkih jezera su objavili Biondić i suradnici (2016).

3. METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Hidrogeološke značajke

Područje Plitvičkih jezera je dio je krškog područja Dinarida u kojemu su vodni sustavi vezani za procese okršavanja karbonatnih stijena mezozojske starosti. Ovo je područje do sada nekoliko puta geološki obrađivano. Za opis geoloških prilika na promatranom području korišteni su podaci geoloških istraživanja koji su objavljeni u sklopu izrade Osnovne geološke karte i prikazani u mjerilu 1 : 100 000 na listu Bihać (Polšak *et al.* 1967) i listu Otočac (Velić *et al.* 1970) te podaci koje je geološki prikazao Polšak (1969) na Geološkoj karti Plitvičkih jezera u mjerilu 1 : 50 000.

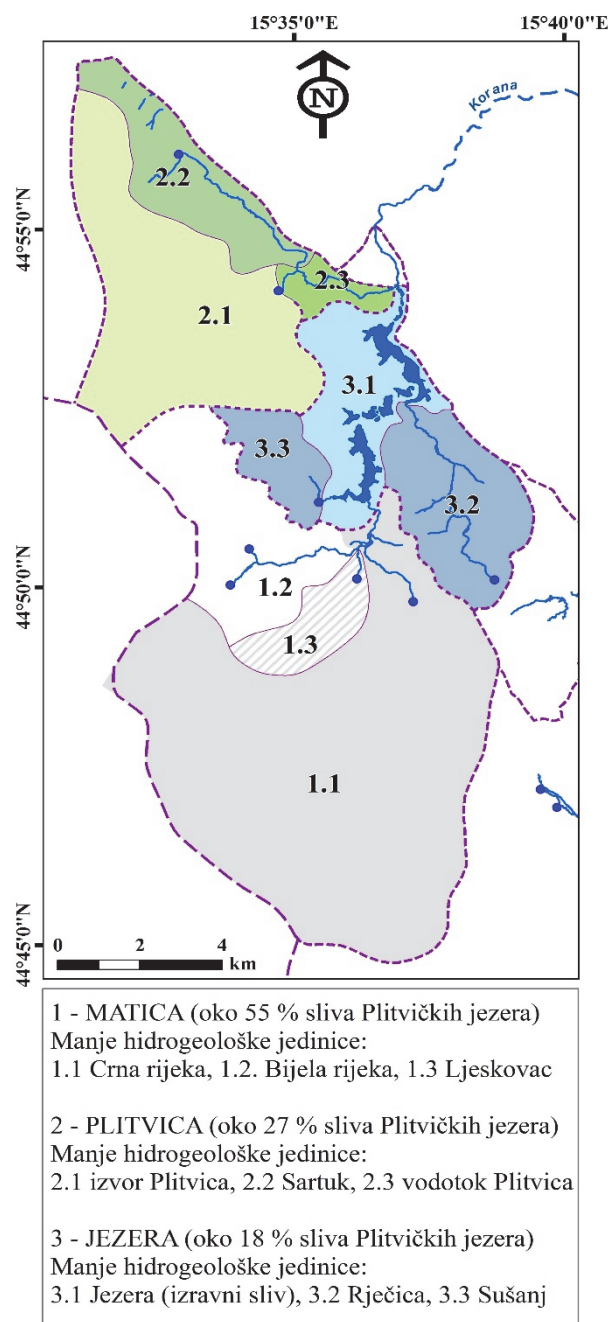
Hidrogeološke značajke i procjene vodopropusnosti stijena određene su prema strukturnim značajkama i litološkom sastavu kao i prema podacima prikupljenima na terenu, a koji su se odnosili na stupanj deformacije pojedinih vrsta stijena i procjeni njihove okršenosti (Biondić *et al.* 2008; Meški 2011). Na promatranom području su izdvojene dobro vodopropusne, osrednje vodopropusne te slabo vodopropusne karbonatne stijene, kao i naslage promjenjivih vodopropusnih svojstava i u cjelini vodonepropusne klastične stijene.

Sliv Plitvičkih jezera pripada crnomorskom slivu i smješten je u graničnome području prema slivu Jadranskog mora. Granice sliva su određene prijašnjim hidrogeološkim istraživanjima (Biondić *et al.* 2008), a novija hidrogeološka, hidrološka i hidrogeokemijska istraživanja pokazuju da se sliv Plitvičkih jezera može podijeliti na tri osnovna podsliva: Maticu, Jezera i Plitvicu (Meški 2011; Meški *et al.* 2014, 2016) (slika 2).

Prostorno gledajući, podsliv Plitvica obuhvaća 27 % ukupne površine sliva Plitvičkih jezera. Istraživanja su osim toga ukazala i na činjenicu da se unutar podsliva Plitvica mogu dodatno izdvojiti i područja koja se izravno dreniraju prema izvoru Plitvice te područja koja izravno dreniraju vodotok Sartuk odnosno vodotok Plitvica (Meški *et al.* 2014).

Promatrani izvor Plitvice, vodotok Plitvica i vodotok Sartuk hidrološki pripadaju istom podslivu Plitvica, jer sve

vode gravitiraju području Sastavaka gdje se spajaju s vodama koje dotječu Plitvičkim jezerima (slika 3).

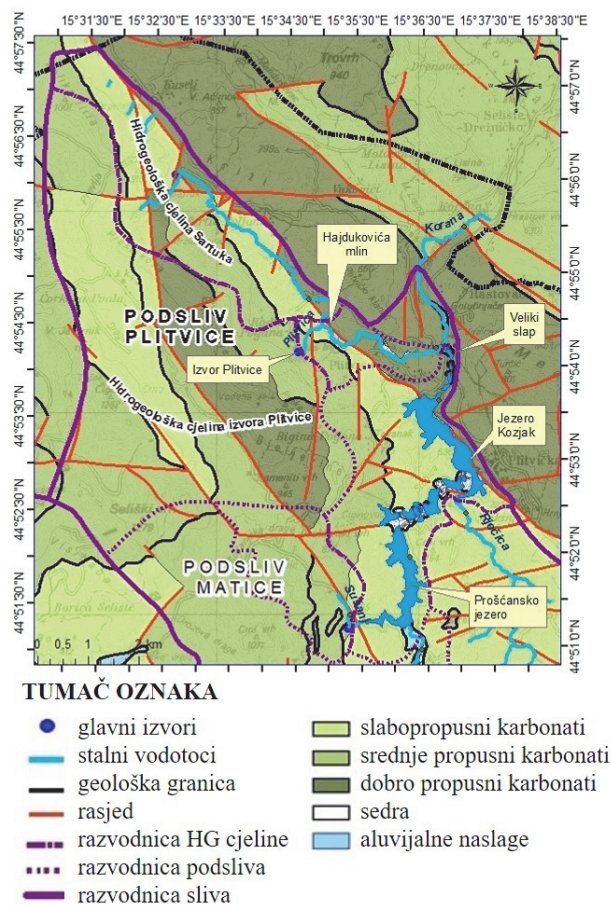


Slika 2. Podjela sliva Plitvičkih jezera na manje podslivove (Meški *et al.* 2016)

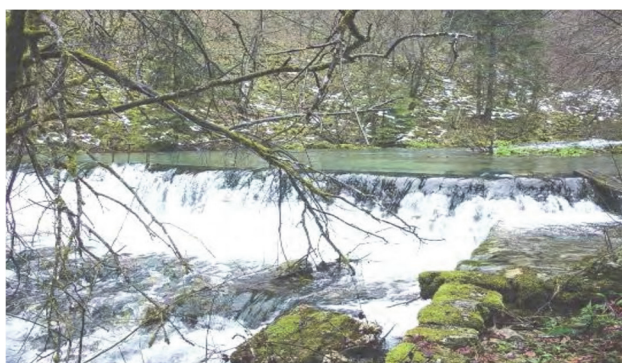
Drenažno područje izvora Plitvice zauzima površinu od oko 28 km² na sjeverozapadnom dijelu sliva Plitvičkih jezera, a izgrađeno je od naslaga donjokredne i dogerske starosti koje čine vapnenci koji su ovdje glavni vodonosnici. Uzlaznim krški izvor Plitvica usječen je u vapnence lijaske starosti. Područje izvora Plitvice na zapadu graniči sa slivom Ličke Jasenice, na sjeveru s drenažnim područjem Sartuka, a u istočnome dijelu s podslivom Jezera. U južnome dijelu ova cjelina graniči s podslivom Maticе (slika 3).

Područje vodotoka Plitvice proteže se od izvora Plitvice (slika 4) do Velikog slapa i ustvari obuhvaća izravni sliv ovog vodotoka, s tim što se u njega dodatno

ulijeva i vodotok Sartuk. S hidrogeološkom cjelinom izvora Plitvice čini jedinstvenu cjelinu, no važno ju je izdvojiti zbog specifičnih problema gubitka vode.



Slika 3. Hidrogeološka karta područja vodotoka Plitvice (modificirano prema Meški 2011)



Slika 4. Izvor Plitvice (Meški 2011)

Vodotok Plitvica u svom 4 km dugom toku protječe kroz stijene različitih hidrogeoloških svojstava (slika 3). Vodotok započinje izdašnim krškim izvorom i prvih 500 m toka teče kroz osrednje vodopropusne karbonate jurske starosti. Nakon toga protječe preko slabo vodopropusnih dolomita gornjotrijaske starosti, a oko 900 m nizvodno od izvora Plitvice u njega utječe vodotok Sartuk. Nakon toga je protok vodotoka Plitvica stabilan. Kada se otprilike dva kilometra nizvodno od izvora Plitvice vode vodotoka Plitvica počnu prelijevati iz područja slabo vodopropusnih

dolomita u područje izgrađeno od dobro vodopropusnih stijena gornjokredne starosti, tada započinju poniranja i smanjenje protoka u vodotoku Plitvica.

Dosadašnja istraživanja su pokazala da sedra ima značajnu ulogu kada je u pitanju gubitak vode iz vodotoka Plitvica (Biondić et al. 2008). Sedra očito ima pozitivnu hidrogeološku funkciju povećanja vododrživosti duž cijeloga korita vodotoka, no unatoč te pozitivne funkcije, zbog velikog sedrenja na nekim mjestima dolazi do izdizanja čitavog korita te se tamo voda izljevaju u livade s vrtačama i sufozijama što doprinosi najznačajnijem gubitku vode vodotoka Plitvice. Jedna od takvih zona poniranja je depresija s desne strane vodotoka nakon Hajduković mlina (slika 5A) te područje Gabrića livade (slika 5B). Takvim tokom vodotok Plitvica stvara nova jezera.



Slika 5. Mjesta s najvećim gubicima vode: (A) Hajdukovića mlin, (B) Gabrića livada (Meški 2011)



Slika 6. Vodotok Sartuk (Meški 2011)

Hidrogeološka cjelina vodotoka Sartuk (slika 2) smještena je na sjevernom dijelu sliva Plitvičkih jezera i obuhvaća područje koje drenira vodotok Sartuk (slika 6).

Ovo je vodotok s malim prinosom vode, a čine ga nekoliko malih izvora s područja slabo vodopropusnih dolomita trijasko starosti. Vodotok se proteže od područja Kuselja jugoistočno prema vodotoku Plitvica. Razvodnica ove cjeline je postavljena temeljem topografije i geološke građe terena; dijelom je površinska, a dijelom je paralelno kontaktu slabije vodopropusnih karbonatnih stijena lijaske starosti i dobro vodopropusnih stijena dogerske starosti.

3.2. Analiza protoka na vodotoku Plitvice

Hidrološka mjerenja na vodotoku Plitvica neposredno prije Velikoga slapa kao i na vodotoku Sartuk započela su 1979. godine uspostavljanjem vodomjernih postaje, s tim da se protoci na njima određuju od 1980. godine.

U radu su obrađeni hidrološki podaci dobiveni od strane DHMZ-a (2014), a koji obuhvaćaju razdoblje od 2001. do 2012. godine za protoke vodotoka Plitvice u profilu vodomjerne postaje Plitvica most (44°54'14" s.g.š., 15°36'39" i.g.d., 515 m n.m.) te vodotoka Sartuk u profilu vodomjerne postaje Sartuk – Rodić Poljana (44°54'48" s.g.š., 15°34'40" i.g.d., 625 m n.m.). Za vrijeme Domovinskog rata nisu rađena mjerenja na ovim vodotocima tako da za razdoblje od 1991. do 1995. godine ne postoje nikakvi podaci. Ciljevi analize protoka na vodotoku Plitvici bili su identifikacija veličine gubitaka vode u vodotoku, ali i usporedba dobivenih vrijednosti s prijašnjim razdobljem analize od 1981. do 1990. godine čije su vrijednosti preuzete iz ranijih istraživanja (Meški 2011).

Gubici vode duž vodotoka Plitvica u ljetnim sušnim razdobljima zapaženi su odmah nakon uspostave prvih hidroloških mjerenja 1979. godine. Zbog toga su se u razdoblju do 1987. dodatno provodila simultana mjerenja u različitim hidrološkim uvjetima na pet profila duž vodotoka Plitvice kako bi se identificirala mjesta najvećih gubitaka duž korita vodotoka Plitvice. Mjerenje protoka je organizirano na sljedećim mjestima (Sumina 1988): Rodić Poljana (područje nakon spoja sa Sartukom), kod Hajdukovića pilane, na Biginoj poljani (područje između Hajdukovića pilane i Velikog slapa) i na Plitvica mostu.

Vodotok Plitvica od početka hidroloških mjerenja do sada nikada nije presušio. Međutim, protoci koji su određivani duž vodotoka Plitvice ukazali su na to da je količina vode koja istječe na izvoru Plitvice mnogo veća od one koja je izmjerena na kraju vodotoka na vodomjernoj postaji Plitvica most. Ove razlike su pogotovo dobro bile izražene tokom sušnih razdoblja.

3.3. Hidrokemijske analize

Kako bi se okarakterizirao hidrokemijski sastav, odredile kemijske promjene u vodnom sustavu te uočili mogući antropogeni utjecaji na kvalitetu vode radile su se hidrokemijske i izotopne analize voda na vodotoku Plitvica. Sustavna terenska mjerenja fizikalno-kemijskih pokazatelja vode (temperature vode, pH, elektrolitičke vodljivosti, koncentracije otopljenog kisika), kao i uzimanje uzoraka vode za kemijske i izotopne analize započela su 2005. godine, a završila krajem 2008. godine (Biondić et al. 2008). U 2006. godini uzimanje uzoraka

vode i terenska mjerenja obavljena su jednom mjesečno dok su u 2007. godini ona obavljena svaka dva mjeseca.

Prema prikupljenim podacima za izvor i vodotok Plitvica bilo je potrebno napraviti usporedbu mjerenih podataka i analizirati dobivene podatke. Uz fizikalne pokazatelje određivane su koncentracije Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- te koncentracije ukupno otopljenih tvari u vodi (TDS).

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

4.1. Sedrene barijere na vodotoku Plitvice

Hidrogeološka analiza istraživanog područja je pokazala da na istraživanom području prevladavaju vapnenci i dolomiti, ali da je ipak najznačajnija pojava na Plitvičkim jezerima proces stvaranja sedre. Sedra se na području Plitvičkih jezera pojavljuje svugdje gdje postoje povoljni hidrokemijski i biološki uvjeti za njen nastanak. Radi se o šupljikavom i poroznom sedimentu koji nastaje inkrustacijom mahovina, cijanobakterija i biljnih ostataka izlučivanjem CaCO_3 iz vode. Izlučivanje sedre je najintenzivnije u uskom području jezerskog sustava gdje se formira na mjestima sedrenih barijera preko kojih se voda prelijevanja iz jezera u jezero. Također je utvrđeno da je brzina rasta sedrenih barijera različita te kada nizvodna barijera raste brže, jezero može potopiti uzvodnu barijeru. Na taj način nastaje prostorno i vremenski vrlo dinamičan i vrlo promjenjiv jezerski sustav.

Samo taloženje sedre je rezultat djelovanja dva procesa. Jedan je anorgansko otpuštanje CO_2 iz vode zbog zagrijavanja ili uslijed pada tlaka pri povećanoj turbulenciji vode, a drugi je organsko uklanjanje CO_2 iz vode biološkim fotosintetskim procesima vodenih biljaka, algi i cijanobakterija.

Dosadašnja istraživanja sedre na području Plitvičkih jezera pokazale su rast sedre u geološkoj prošlosti i recentnom vremenu, odnosno kontinuirani proces sedrenja u posljednjih 7000 godina u današnjim tokovima i jezerima. Dobivena starost starih sedrenih naslaga poklapaju se s razdobljima interglacijala Riss/Würm i Mindel/Riss, odnosno da je taloženje sedre bilo intenzivnije u toplijim klimatskim periodima (interglacijalima) (Srdoč et al. 1985; Horvatinić 1985; Srdoč et al. 1986).

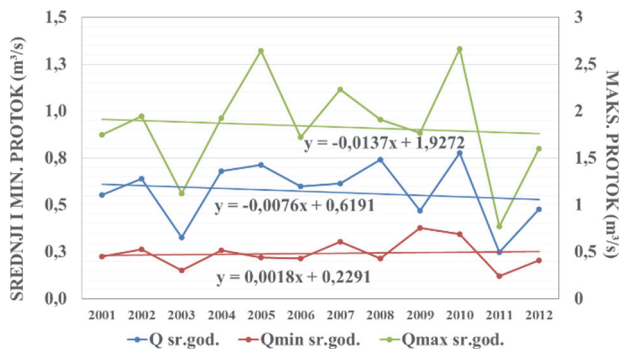
4.2. Rezultati analize protoka na Plitvici i Sartuku

Obrađeni vremenski niz minimalnih godišnjih protoka vodotoka Plitvice na vodomjernoj postaji Plitvica most u razdoblju od 2001 do 2012. (Marčiuš 2014) pokazuje da je prosječni minimalni godišnji protok iznosio $0,063 \text{ m}^3/\text{s}$ uz koeficijent varijacije 0,33 (slika 7). U razdoblju od 1981. do 1990. godine prosječni minimalni godišnji protok Plitvice iznosio je $0,098 \text{ m}^3/\text{s}$, uz koeficijent varijacije 0,59 (Meški 2011).

Ako se uspoređi razdoblje mjerenja od 1981. do 1990. godine s razdobljem od 2001. do 2012. godine može se uočiti smanjenje prosječnih minimalnih protoka za 35 %. Međutim, pogreške koeficijenta varijacije oba niza su veće

od 10 % tako da dobivene vrijednosti treba uzeti samo kao orijentacijske jer su dobivene na osnovi prekratkih nizova.

Vremenski niz maksimalnih godišnjih protoka vodotoka Plitvice u profilu vodomjerne postaje Plitvica most u razdoblju od 2001. do 2012. godine (Marciuš 2014) pokazuje da je prosječni maksimalni godišnji protok za cijelo (nehomogeno) razdoblje opažanja od 2001. do 2012. godine iznosio 4,58 m³/s, s tim da je zabilježen negativan linearni trend, s prosječnim godišnjim smanjenjem protoka za 0,0137 m³/s (slika 7).



Slika 7. Vremenski nizovi godišnjih protoka vodotoka Plitvice u profilu v.p. Plitvica most od 2001. do 2012.

Usporedbom razdoblja do 1990. godine i onoga nakon uočava se smanjenje prosječnih maksimalnih protoka vodotoka Plitvice u profilu Plitvica most za otprilike 29,2 %.

Vremenski niz srednjih godišnjih protoka ima negativan linearni trend s prosječnim godišnjim smanjenjem protoka za 0,008 m³/s. Prosječni srednji godišnji protok u razdoblju od 2001. do 2012. je iznosio 0,570 m³/s; najmanji srednji protok je bio 2011. (0,119 m³/s), a najveći 2009. (0,374 m³/s) i 2010. godine (0,343 m³/s).

Zanimljivo je spomenuti da je prosječni maksimum u tom razdoblju bio 4,27 m³/s dok je najmanji protok bio u rujnu i listopadu 2011. godine i iznosio je svega 0,006 m³/s. Cijeli homogeni vremenski niz minimalnih godišnjih protoka ima pozitivan linearni trend, s prosječnim godišnjim povećanjem protoka za oko 0,002 m³/s (slika 7).

Osim analize vremenskih nizova minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih protoka napravljena je i analiza karakterističnih mjesečnih protoka kako bi se dobile vrijednosti unutar godišnje raspodjele malih, srednjih i velikih voda vodotoka Plitvice u promatranom razdoblju od 2001. do 2012. godine.

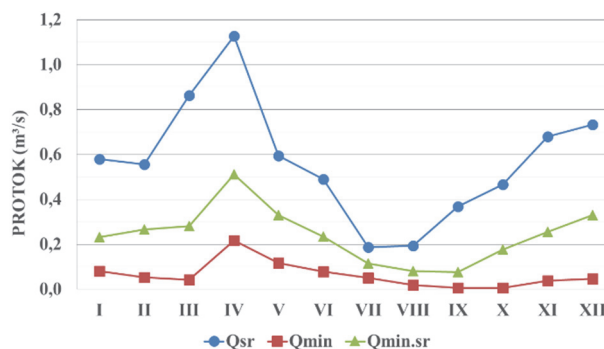
Prosječni minimalni godišnji protok u razdoblju od 2001. do 2012. godine iznosio je 0,063 m³/s (slika 8). Usporedbom s razdobljem od 1981. do 1990. godine, kada je protok iznosio 0,098 m³/s (Meški 2011), uočava se smanjenje prosječnih minimalnih protoka u profilu vodomjerne postaje Plitvica most za 42 %.

Maksimalni protoci vezani su za proljeće, odnosno za ožujak i travanj zbog topljenja snijega, kao i za jesen kada započinju kišna razdoblja. Srednji maksimumi protoka u travnju su iznosili oko 1,15 m³/s, dok je u srpnju to bilo svega 0,187 m³/s (slika 9). U razdoblju od 2001. do 2012. godine vodotok Plitvica je u prosjeku bio najbogatiji

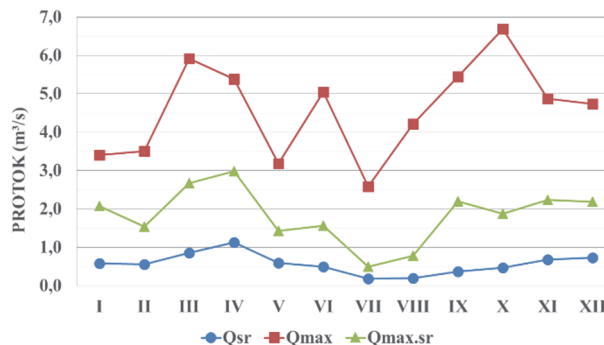
vodom u travnju, prosječno 2,98 m³/s, a najmanje vode je bilo u kolovozu, prosječno 0,077 m³/s.

Jedini prtok vodotoka Plitvice je već spomenuti vodotok Sartuk koji se ulijeva s lijeve strane otprilike 900 m nizvodno od izvora Plitvice.

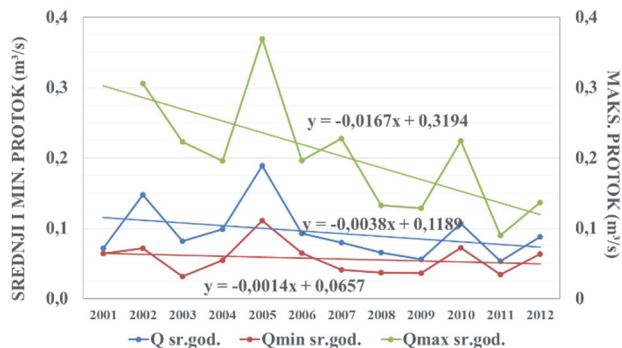
Srednji godišnji protok Sartuka za cijelo homogeno razdoblje opažanja od 2001. do 2012. godine iznosio je 0,096 m³/s, s tim da su najmanji srednji protoci bili 2011. (0,053 m³/s) i 2009. godine (0,056 m³/s), a najveći 2005. (0,189 m³/s). Vremenski niz cijelog promatranog razdoblja ima trend smanjenja srednjih protoka za 0,004 m³/s (slika 10).



Slika 8. Karakteristični mjesečni protoci srednjih i malih voda vodotoka Plitvica od 2001. do 2012.



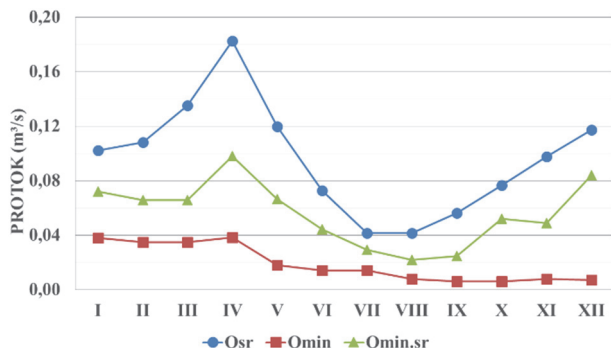
Slika 9. Karakteristični mjesečni protoci srednjih i velikih voda vodotoka Plitvica od 2001. do 2012.



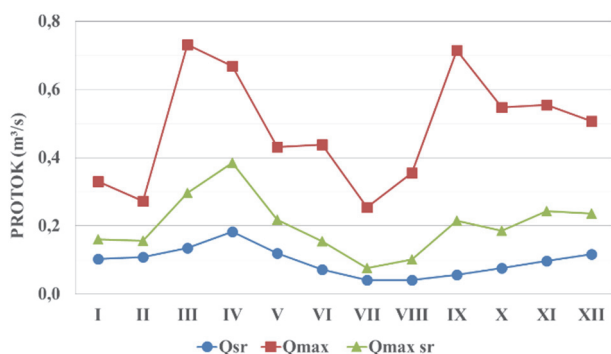
Slika 10. Vremenski nizovi godišnjih protoka vodotoka Sartuk u profilu v.p. Rodić Poljana od 2001. do 2012.

Prosječni minimalni godišnji protok za razdoblje opažanja od 2001. do 2012. godine iznosio je 0,08 m³/s, dok su najmanji minimalni protoci bili tijekom listopada 2009. i rujna 2011. te su iznosili 0,006 m³/s (slika 11).

Vodotok Sartuk je u prosjeku najbogatiji vodom u travnju (prosječno 0,182 m³/s), a najmanje vode ima u kolovozu, prosječno 0,042 m³/s (slika 11). Maksimalni protoci su bili u razdoblju od ožujka do svibnja, i u rujnu, s time da je maksimalni protok zabilježen u ožujku 2005. i iznosio je 0,731 m³/s (slika 12).



Slika 11. Karakteristični mjesečni protoci srednjih i malih voda vodotoka Sartuk od 2001. do 2012.



Slika 12. Karakteristični mjesečni protoci srednjih i velikih voda vodotoka Sartuk od 2001. do 2012.

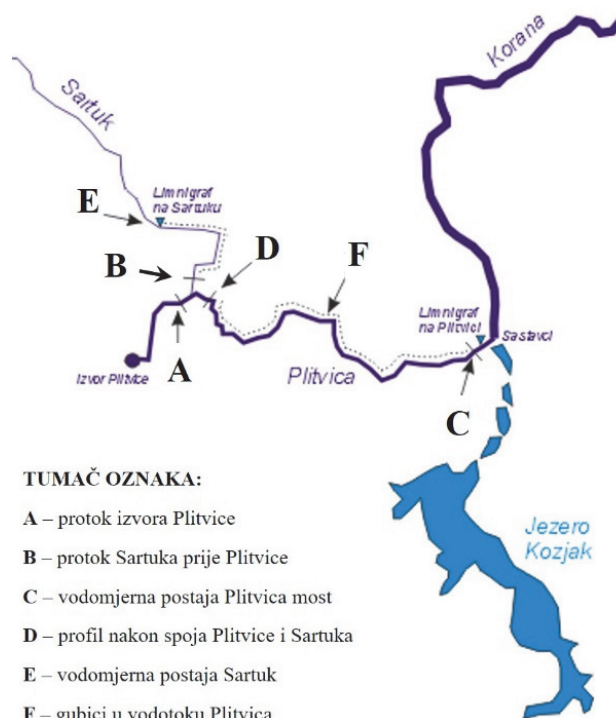
4.2. Gubici vode duž vodotoka Plitvice i procjena istjecanja na izvoru Plitvice

Za daljnju analizu protoka bilo je neophodno izračunati, odnosno procijeniti izdašnost samog izvora Plitvice. S obzirom da su na raspolaganju samo podaci o protocima vodotoka Plitvice s vodomjerne postaje Plitvica most koja se nalazi iznad Velikog slapa, i podaci o protocima vodotoka Sartuk s vodomjerne postaje Sartuk-Rodić Poljana, dodatni problem u ovoj procjeni predstavlja činjenica da su duž vodotoka Plitvice usprkos višestrukim mjerenjima potvrđeni gubici vode čija je točna vrijednost i dalje nepoznata (slika 13).

S obzirom da su dobivene dobre korelacije protoka izmjerenih nakon spoja Plitvice i Sartuka (slika 13, D) i protoka na Plitvici prije Velikoga slapa (slika 13, C), te protoka izmjerenih na limnigrafu vodotoka Sartuk (slika 13, E) i protoka izmjerenih prije njegovog utoka u Plitvicu (slika 13, B) bilo je moguće primijeniti jednadžbe linearne regresije (Meaški 2011) (slika 14).

Usporedbom protoka na vodotoku Plitvica i na vodotoku Sartuk u razdoblju od 1981. do 2008. godine te prema korelaciji podataka i uz pomoć jednadžbe linearne regresije (slika 14) dobivene su vrijednosti potrebne za

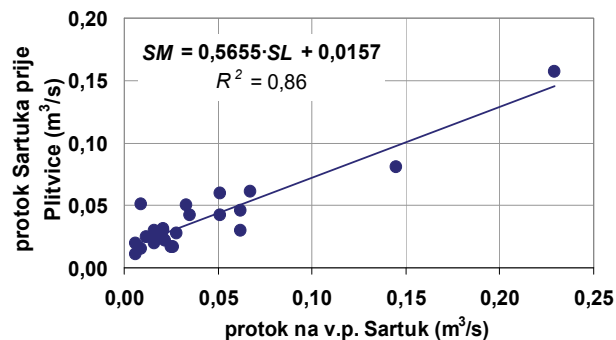
izračun izdašnosti izvora Plitvice. Izdašnost izvora Plitvice je razlika protoka Plitvice i Sartuka (0,819 m³/s) i protoka vodotoka Sartuk prije utoka u Plitvicu (0,069 m³/s), a u razdoblju od 2001. do 2012. godine to iznosi prosječno oko 0,754 m³/s (Marcius 2014).



TUMAČ OZNAKA:

- A – protok izvora Plitvice
- B – protok Sartuka prije Plitvice
- C – vodomjerna postaja Plitvica most
- D – profil nakon spoja Plitvice i Sartuka
- E – vodomjerna postaja Sartuk
- F – gubici u vodotoku Plitvica

Slika 13. Skica mjernih točaka za proračun gubitaka na vodotoku Plitvice

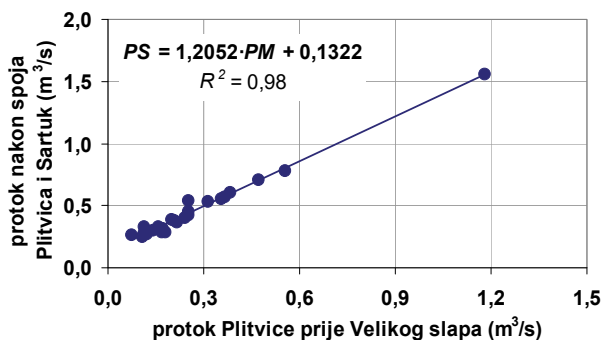


Oznake:
 PS – protok na Plitvici izmjeren nakon spoja Plitvice i Sartuka (m³/s);
 PM – protok na Plitvici izmjeren prije Velikoga slapa (m³/s);
 SM – protok na Sartuku izmjeren prije utoka u Plitvicu (m³/s);
 SL – protok u profilu v.p. Sartuk (m³/s); R2 – koeficijent determinacije

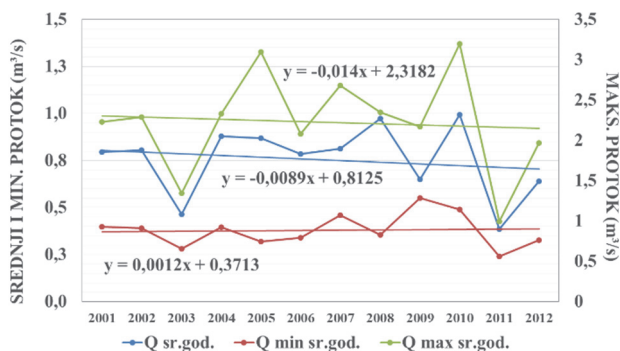
Srednji godišnji protok za cijelo razdoblje opažanja od 2001. do 2012. godine iznosio je prema ovakvoj procjeni 0,754 m³/s, s tim da su najmanji srednji protoci bili 2003. (0,464 m³/s) i 2011. godine (0,385 m³/s), a najveći 2005. (3,19 m³/s). Vremenski niz cijelog promatranog razdoblja ima trend smanjenja protoka od 0,009 m³/s (slika 15).

Prosječni procijenjeni minimalni godišnji protok za razdoblje opažanja od 2001. do 2012. godine iznosio je 0,378 m³/s, s tim da su najmanji procijenjeni minimalni protoci bili tijekom 2003. s protokom od 0,281 m³/s i 2011. s protokom od 0,241 m³/s (slika 16). Usporedbom

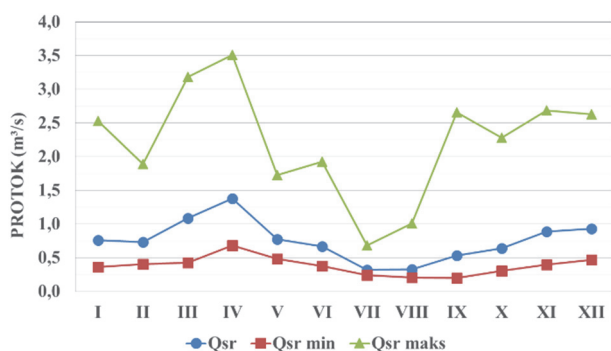
izdašnosti izvora za razdoblje od 1981. do 2008. godine koji je tada iznosio 0,853 m³/s (Meaški 2011) i ovog u razdoblju od 2001. do 2012. godine dolazi se do značajnog smanjenja protoka na izvoru Plitvice, a koji otprilike iznosi 0,100 m³/s. Time se može zaključiti da u promatranom razdoblju postoji pad izdašnosti na izvoru što doprinosi smanjenju protoka iznad Velikog slapa.



Slika 14. Korelacije protoka na vodotoku Plitvica i vodotoku Sartuk (Meaški 2011)



Slika 15. Vremenski nizovi procijenjenih godišnjih protoka izvora Plitvice od 2001. do 2012. godine

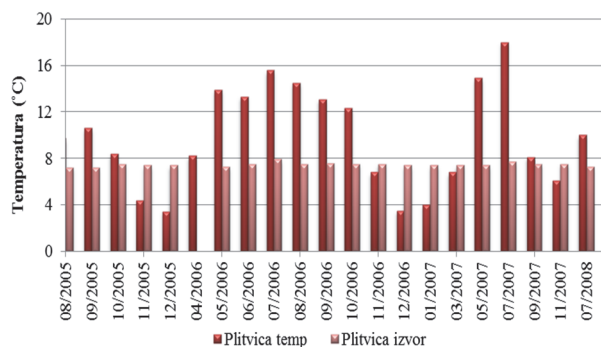


Slika 16. Karakteristični procijenjeni mjesečni protoci na izvoru Plitvice od 2001. do 2012. godine

4.2. Rezultati hidrokemijskih analiza

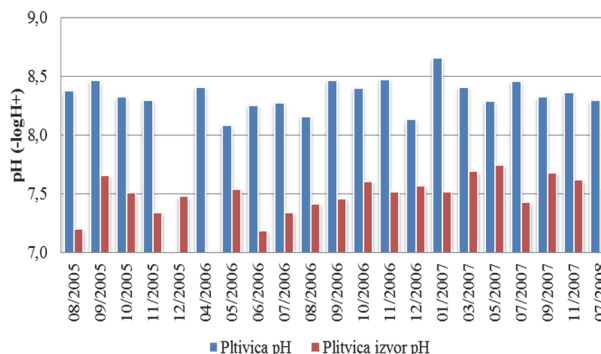
Temperatura vode na izvoru Plitvice konstantna je tijekom cijele godine i kreće se oko 7,5 °C, a vjerojatni razlog je dobro miješanje vode u podzemlju. S druge strane, temperatura potoka Plitvice varira tijekom godišnjih doba odnosno u ljetnim mjesecima voda ima

povećanu temperaturu zbog zagrijavanja, a u zimskim mjesecima je temperatura niža zbog površinskog toka vodotoka Plitvice. Prosječna temperatura mjerena iznad Velikog slapa kreće u rasponu od 3 °C zimi do 18 °C ljeti (slika 17).



Slika 17. Temperaturne razlike na izvoru Plitvica i vodotoku Plitvica u razdoblju od 2005. do 2008.

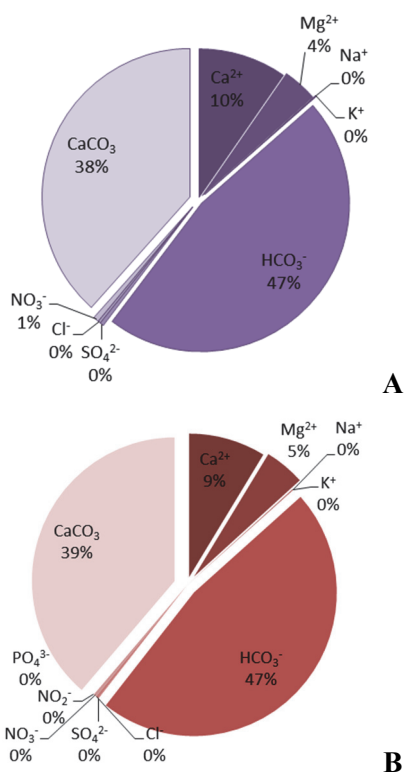
Zbog zagrijavanja vode dolazi i do otpinjanja CO₂ u atmosferu te dolazi do smanjenja kiselosti i postupnog izlučivanja kalcijevog karbonata iz vode, što ima za posljedicu pretvaranje potoka Plitvice u sedrenu rijeku (Barešić et al. 2009). Općenito su pH vrijednost vodotoka Plitvice znatno povišena u odnosu na pH izvora Plitvice što je i jedan od uvjeta nastajanja sedre (slika 18).



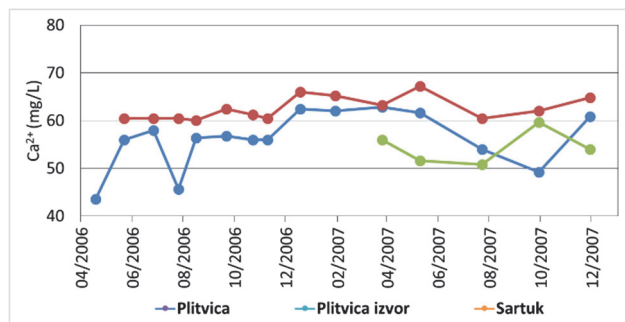
Slika 18. Prikaz pH vrijednosti na vodotoku Plitvice i izvoru Plitvice u razdoblju od 2005. do 2008.

Koncentracija Na⁺, K⁺, Cl⁻ i SO₄²⁻ iona u vodama općenito je niska i zajedno čine svega 1 % ukupnoga kemijskog sastava vode. No ipak, postoje svojevrsne razlike među vodama koje se mogu zapaziti i koje iako male mogu upućivati na drugačiju građu pojedinih dijelova sliva, na drugačije pokrovne naslage i na mogući antropogeni utjecaj (slika 19 A, B).

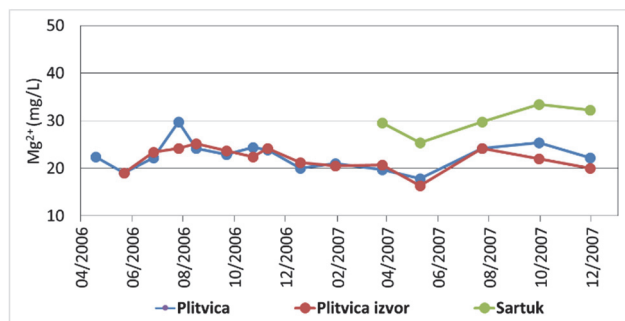
Sadržaj Ca²⁺ iona pokazuje kontinuirani pad koncentracije duž sustava Plitvička jezera od izvorišne zone do mjesta istjecanja vode iz sustava. Pad koncentracije kalcijevih iona u vodi prvenstveno je posljedica taloženja sedre. Situacija je slična i sa vodotokom Plitvica jer je u promatranom razdoblju na izvoru Plitvice prosječna vrijednost sadržaja Ca²⁺ iona u vodi 63 mg/L, dok je na kraju vodotoka Plitvice sadržaja Ca²⁺ iona u vodi približno 56 mg/L (slika 20). Prosječna vrijednost sadržaja Ca²⁺ iona u vodi vodotoka Sartuk je bila 55 mg/L.



Slika 19. Prosječne vrijednosti udjela glavnih iona na (a) vodotoku Plitvice i (b) vodotoku Sartuk



Slika 20. Koncentracije Ca²⁺ iona mjerene na vodotoku Sartuk i na izvoru Plitvice



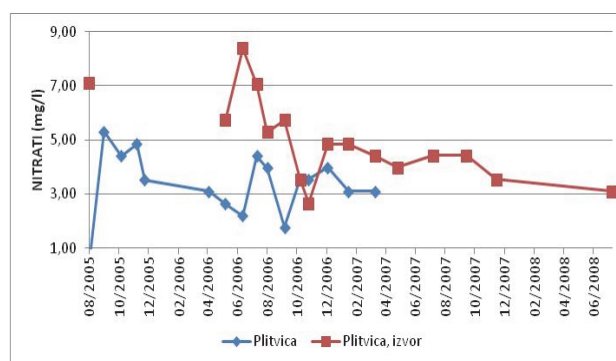
Slika 21. Udio magnezijevih iona na vodotoku Plitvice, izvoru Plitvice i Sartuku

Magnezijevih iona, za razliku od kalcijevih, nema u svim vodama podjednako (slika 21). Do obogaćivanja vode magnezijevim ionima u odnosu na kalcijeve ione dolazi i zbog taloženja sedre duž cijelog jezerskog sustava,

jer zbog manjeg izlučivanja dolomita iz vode u odnosu na izlučivanje kalcita, dolazi do smanjenja koncentracije kalcijevih iona u vodi (Biondić et al. 2008; Meaški 2011).

Na vodotoku Sartuk najviše izmjerene koncentracije Mg²⁺ iona u promatranom razdoblju su prosječno 30 mg/L dok su na izvoru Plitvice izmjerene koncentracije od 21,5 mg/L. Na kraju vodotoka Plitvice, prije Velikog slapa, Mg²⁺ iona u vodi ima oko 22 mg/L (slika 21).

Na području Plitvičkih jezera nema izražajnije poljoprivredne djelatnosti te stoga nema ni fosfata u vodama, s druge strane zabilježene su povišene koncentracije nitrata. U skupinu izvora i vodotoka s povišenim koncentracijama nitrata spada i izvor Plitvice s prosjekom od 4,9 mg/L, ali i 8,4 mg/L u svibnju 2006. čime je doseguta i najveća vrijednost nitrata u usporedbi s ostalim izvorima (slika 22). Dobivene koncentracije nitrata su vrlo niske te ukazuju na vrlo mali antropogeni utjecaj na sustav Plitvičkih jezera.



Slika 22. Koncentracije nitrata na vodotoku Plitvice i izvoru Plitvice za razdoblje od 2005. do 2008. godine

5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Cilj rada bio je analizirati veličine protoka na vodotoku Plitvice te na temelju protoka vodotoka Plitvice i vodotoka Sartuk pokušati utvrditi veličinu i uzroke gubitaka vode na području od spoja Sartuka i izvora Plitvice do mjerne postaje na Velikom slapu. Uz to je rađena i analiza fizikalno-kemijskih pokazatelja kako bi se potvrdilo pojedine pretpostavke vezane za moguće uzroke gubitaka vode.

Hidrokemijskom analizom je utvrđeno da je temperatura vode na vodotocima konstantna, ali da na nju utječu godišnja doba. Uz temperaturu vode, analizirana je i pH vrijednost koja je nešto povišena na vodotoku Sartuk. Povišena pH vrijednost na Sartuku može biti posljedica donosa kopnenog materijala, tj. ispiranja vapnenca jer taloženje kalcita u obliku mulja i sedri u potpunosti izostaje. Vrijednosti parametara bitnih za taloženje kalcijevog karbonata u obliku jezerskih sedimenata i sedri pokazuju da proces sedrenja na vodotoku Plitvice nije ugrožen.

Vodotok Plitvice započinje krškim izvorom, čije su vode natprosječno bogate kalcijem, ali u vodi ima i sulfata te kalija i nitrata. Očito je riječ o pretežno vapnenačkom vodonosniku s mogućim pojavama sulfatnih minerala. Prisutnost kalija i nitrata upućuje na ispiranje pokrovnoga tla. Pritok Plitvice i vodotok Sartuk s obzirom na osnovne ione Ca²⁺, Mg²⁺ i HCO₃⁻ imaju kemijski uravnoteženu vodu (slika 19). S obzirom na slivno područje ovog

vodotoka, nešto povišeni kalij može biti i antropogenog porijekla (naselje Kuselj).

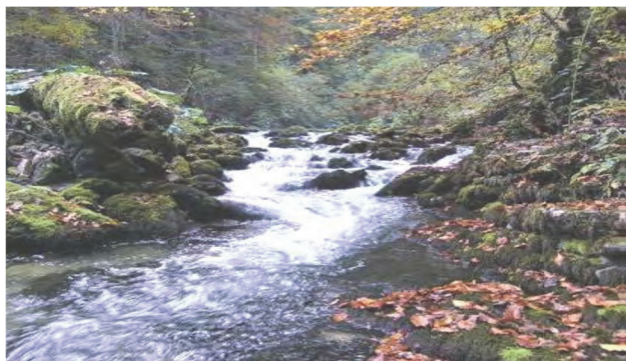
Povišeni nitrati u prirodi mogu biti posljedica i prirodnih procesa ili antropogenog porijekla. S obzirom na to da su u slivu Plitvičkih jezera izmjerene male vrijednosti nitrata, vjerojatnije se radi o prirodnim procesima zbog truljenja u neposrednom slivu izvora, jer u slivu nema većih antropogenih izvora onečišćenja. Ove vrijednosti također ukazuju na činjenicu kako i ovdje površinski dio sliva dosta reagira na promjene u hidrološkom režimu, ali su one nešto slabije izražene. Također, takvo ponašanje ukazuje na dulje zadržavanje dijela vode u krškom podzemlju. Važno je primijetiti i opadanja vrijednosti nitrata izmjerenih na izvoru Plitvice i onih izmjerenih na kraju vodotoka Plitvice (slika 22). Time se dolazi do zaključka da izravni sliv Plitvice ne utječe na dodatno povećanje nitrata u vodi, već smanjuje njihovu koncentraciju razrjeđivanjem.

Vodotok Plitvica je u slivu Plitvičkih jezera zasebni vodni sustav, koji se s jezerskim vodama spaja tek na njihovom kraju, u području Sastavaka, gdje započinje tok rijeke Korane. Područje vodotoka Plitvice podijeljeno je na tri hidrogeološke cjeline, cjelinu vodotoka Plitvice, izvora Plitvice i vodotoka Sartuk.

Vodotok Plitvica započinje izdašnim krškim izvorom, smještenim unutar osrednje vodopropusnih karbonata jurske starosti, oko 2 km nizvodno od izvora nastavlja tok preko dobro vodopropusnih stijena gornjokredne starosti. Utvrđeno je da je to je ujedno i glavni razlog poniranja te velikih gubitaka vode duž vodotoka na području nakon Kozjačkog rasjeda, posebice u ljetnim mjesecima.

Utvrđeno je da je proces pojave i nastanka sedrenih barijera vrlo dobro vidljiv upravo na vodotoku Plitvice te da ovaj vodotok hidrogeološki gledano ustvari predstavlja umanjeni sustav Plitvičkih jezera (Meški 2011). Naime, na samom početku svog toka vodotok Plitvica ne sedri, iako je izvorska voda prezasićena kalcijevim karbonatom, što je jedna od nužnih uvjeta da bi uopće moglo doći do pojave sedrenja (slika 23).

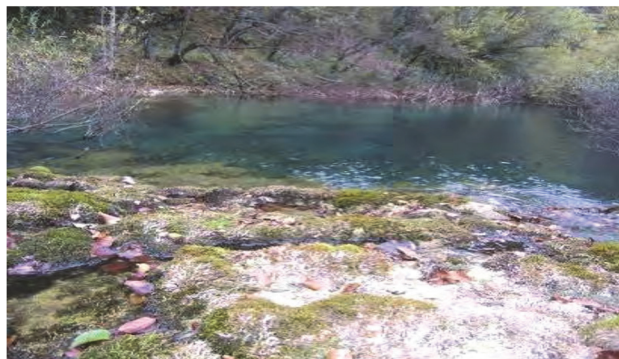
Početak taloženja sedre i razvoj sedrenih barijera u vodotoku Plitvice je vezan za područje neposredno prije Hajdukovića mlina koje se nalazi otprilike 2 km nizvodno od izvora Plitvice (slika 24).



Slika 23. Gornji tok Plitvice bez sedrenja (Meški 2011)

Već je prijašnjim istraživanjima utvrđeno da su važni faktori u procesu sedrenja brzina vode u rasponu 0,5-3,5 m/s, pH vode iznad 8, smanjena koncentracija otopljenih organske tvari te posredno djelovanje živih organizama (Srdoč et al. 1985). Nakon što su nizvodnije

zadovoljeni ovi fizikalno-kemijskih i biološki uvjeti pojava sedrenja započinje i u vodotoku Plitvice (slika 24).



Slika 24. Prve pojave sedre prije Hajdukovića mlina (Meški 2011)

Nakon Hajdukovića mlina proces sedrenja je stalan i za sada neprekinut, a na nekim mjestima i toliko velik da izdiže cijelo korito te dolazi do izlivanja vode u susjedne livade s vrtačama i sufozijama, gdje se za vrijeme sušnih razdoblja u podzemlje gubi najveći dio vode vodotoka Plitvica (slika 5).

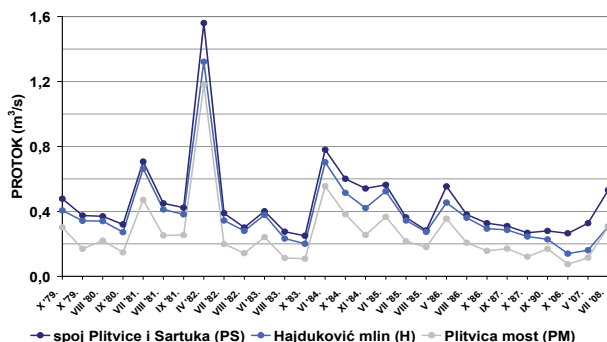
Zanimljivo je napomenuti da je glavni pritek vodotoka Plitvice - vodotok Sartuk nekada sedrio, ali danas to više nije slučaj. Kao glavni razlog se navodi povećana količina otopljenih organskih tvari što je dokazano inhibitor procesa sedrenja (Srdoč et al. 1985).

Rezultati analize hidroloških podataka pokazali su da su gubici vode od izvora Plitvice do Velikog slapa u razdoblju od 2001. do 2012. godine iznosili 0,250 m³/s. S obzirom na izdašnost izvora Plitvice koja je iznosila 0,754 m³/s ovakvi gubici su značajni. Temeljem analiza se može zaključiti da su protoci na vodotoku Plitvica most, vodotoku Sartuk i izvoru Plitvice najbogatiji vodom u razdoblju od ožujka do svibnja kao posljedica otapanja snijega, te u rujnu i listopadu zbog jesenskih kiša. Usporedi li se razdoblje promatranja od 1981. do 1990. godine s podacima od 2001. do 2012. godine uočava se smanjenje srednjih godišnjih protoka. Do 90-ih godina prošloga stoljeća manji gubici su zapažani do profila nakon Hajdukovića mlina, a veći gubici između profila nakon Hajdukovića mlina i Velikoga slapa. No mjerenjima u razdoblju od 2001. do 2012. godine uočava se obrnuta raspodjela gubitaka što znači da su se gubici vode povećali na području Hajdukovića mlina, gdje su terenskim istraživanjima i uočena veća izlivanja vode iz korita u okolno vrlo propusno područje. S druge pak strane, gubici između Hajdukovića mlina i Velikoga slapa su nešto smanjeni u odnosu na 90-te i to približno za 0,100 m³/s. Vrijednosti dobivenih prosječnih gubitaka vodotoka Plitvice, od spoja sa Sartukom do Velikoga slapa, iznose oko 0,249 m³/s. Gubici su dobiveni proračunom razlike protoka nakon spoja Plitvice i Sartuka i protoka na vodomjernoj postaji Plitvica most.

Odnos ovih proračuna vidljiv je i iz prethodnih analiza (slika 25). Profil prije spoja sa Sartukom zbog slabo dolomitnih stijena gotovo je jednak protoku neposredno nakon izvora Plitvice.

Za vrijeme velikih voda gubici nisu toliko zamjetni, no u sušnim razdobljima kada je prosječni minimalni protok 63 L/s, ovakav manjak od gotovo 250 L/s može se lako

zamijetiti. Za razdoblje od 1979. do 2008. prosječni protoci su iznosili 0,857 m³/s, a srednji gubitak vode je bio i do 60 %.



Slika 25. Mjereni protoci na karakterističnim profilima na vodotoku Plitvice (Meaški 2011)

Značajno je primijetiti (slika 25) da je protok nakon spoja Plitvice i Sartuka veći od protoka izmjenjenog na vodomjernoj postaji Plitvica most. Na relaciji od spoja Plitvice i Sartuka do Hajdukovića mlina gubici vode su otprilike uvijek jednaki i dosta mali, dok se nakon toga povećavaju zbog spomenutog poniranja na lijevoj obali vodotoka (Biondić et al. 2008; Meaški 2011).

Uzevši u obzir podatke od 2001. do 2012. godine mjerenja na Plitvici pokazala su da je srednji godišnji protok vodotoka Plitvica iznosio 0,570 m³/s dok je na vodotoku Sartuk protok bio 0,096 m³/s. Hidrološka analiza vodotoka Plitvice na mjerne staciji Plitvica ima koeficijent varijacije 0,27 i pogrešku koeficijenta varijacije 7 %. S obzirom na podatke iz 80-tih godina do danas jasno se mogu uočiti određene promjene u količini i raspodjeli gubitaka vode duž toka Plitvice.

Detaljnijim razmatranjem uočeno je da su se s vremenom gubici povećali. Do 1990. godine oni su iznosili od 30 % do 55 % od ukupnog početnog protoka vodotoka Plitvice, dok su hidrološke analize koje su uzele u obzir mjerenja do 2007. godine pokazale da gubici danas iznose i do 65 % početnog protoka vodotoka Plitvice.

6. ZAHVALE

Dobar dio podataka je prikupljen u okviru projekta „Održivo korištenje i zaštita vodnih resursa na području Plitvičkih jezera“, financiranog od strane Nacionalnog parka i Vlade Republike Austrije kroz Competence network "Water resources and their management" u sklopu Joanneum Research instituta iz Graza. Autori se stoga ovom prilikom žele zahvaliti svim suradnicima iz Joanneum Research instituta (Graz, Austrija), znanstveno-stručnog centra „Ivo Pevalak“ (Javna ustanova Nacionalni park Plitvička jezera) te Zavoda za hidrotehniku na Geotehničkom fakultetu (Sveučilište u Zagrebu).

7. LITERATURA

Babinka, S. (2007): Multi-Tracer Study of Karst Waters and Lake Sediments in Croatia and Bosnia and Herzegovina: Plitvice Lakes National Park and Bihać Area. Doktorska disertacija, Universität Bonn, 168 str., Bonn

Barešić, J. (2009): Primjena izotopnih i geokemijskih metoda u praćenju globalnih i lokalnih promjena u ekološkom sustavu Plitvička jezera. Doktorska disertacija, Fakultet kemijskog inženjstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 163 str., Zagreb

Biondić, B., Zojer, H., Yehdegho, B., Biondić, R., Kapelj, S., Meaški, H., Zwicker, G. (2008): Održivo korištenje i zaštita vodnih resursa na području Plitvičkih jezera, Završno izvješće. Arhiv Geotehničkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin

Biondić, D., Barbalić, D. (2004): Maksimalni protoci hrvatskih vodotoka crnomorskog sliva. U: Žugaj, R. (ur.): Seminar Velike i male vode, Zbornik radova. Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. (2016): Hydrogeology of the sinking zone of the Korana River downstream of the Plitvice Lakes, Croatia. Acta carsologica, 45 (1); 43-56.

Božičević, S. (1969): Pećine, jame i ponori s vodom u području dinarskog krša. Krš Jugoslavije, Zagreb

Božičević, S. (1971): Razvoj speleoloških istraživanja dinarskog krša. JAZU – Simpozij o zaštiti prirode u kršu, Zagreb

Božičević, S. (1973): Podzemni svijet Like – Ličke spilje. Poseban otisak iz knjige Lika u prošlosti isadašnjosti. Zbornik, 5, Historijski arhiv u Karlovcu

Božičević, S. (1991): Fenomen krš. Školska knjiga, 104 str., Zagreb

Dešković, I., Marušić, R., Pedišić, M., Sipos, L., Krga, M. (1984): Neki najnoviji rezultati hidrokemijsko-hidroloških istraživanja voda na području Plitvičkih jezera.

Dešković, I., Pedišić, M., Marušić, R., Milenković, V. (1981): Značaj, svrha i neki rezultati hidrokemijskih, hidroloških i sanitarnih istraživanja površinskih i podzemnih voda Nacionalnog parka Plitvička jezera. Vodoprivreda, Beograd

Emili, H. (1958): Hidrobiološka istraživanja na Plitvičkim jezerima. U: Šafar, J. (ur.): Nacionalni park Plitvička jezera, Grafički zavod Hrvatske, Zagreb

Emili, H. (1965): Prilog poznavanju sanitarne vrijednosti izvora i vodotokova u Nacionalnom parku Plitvička jezera. Plitvički bilten Vodoprivreda 16 Beograd

Franić, D. (1910): Plitvička jezera i njihova okolica, Zagreb

Gavazzi, A. (1904): Geneza Plitvičkih jezera. Naravoslovni glasnik Hrv. prir. društva, God. XV

Gavazzi, A. (1919): Prilozi limnologiji Plitvica. Prirodoslovna istraživanja Hrvatske i Slovenije

Herak, M. (1962): Tektonska osnova hidrogeoloških odnosa u izvornim područjima Kupe i Korane (s Plitvičkim jezerima). Referati V. sav. geol. FNR Jugosl. 3, Beograd

Iveković, H. (1958): Mijenjanje kemijskog sastava vode Plitvičkih jezera. U: Šafar, J. (ur.): Plitvička jezera, Nacionalni park. Grafički zavod Hrvatske, 227-274, Zagreb

Koch, F. (1916): Izvještaj o geološkim odnošajima u opsegu lista Plitvice. Vijesti geol. povj., Zagreb

Koch, F. (1926): Plitvička jezera, Prilog poznavanju tektonike i hidrografije krša. Vijesti Geol. Zavoda, I, Zagreb

Makjanić, B. (1958): Prilog klimatologiji područja Plitvičkih jezera. Nacionalni park Plitvička jezera, Zagreb

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

Marcuš, M. (2014): Hidrogeološke značajke izvora i vodotoka Plitvice na području Plitvičkih jezera. Diplomski rad. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin

Meaški, H., Biondić, B., Biondić, R. (2014): Delineation of a karst catchment area using several methods – an example of Plitvice Lakes catchment. In: Kukurč, N., Stevanović, Z., Krešić, N.

(eds): Proceedings of International Conference and Field Seminar "Karst Without Boundaries", Trebinje (BiH). DIKTAS Project, 2014. 118-123

Meški, H., Biondić, B., Biondić, R. (2016): Delineation of the Plitvice Lakes karst catchment area, Croatia. In: Stevanović, Zoran ; Krešić, Neven ; Kukurić, Neno (eds.): Karst without Boundaries. International Association of Hydrogeologists - Selected papers. Nizozemska : CRC Press/Balkema; 269-284.

Obelić, B., Horvatinčić, N., Krajcar Bronić, I. (2000): Fizičko-kemijska i izotopna istraživanja vode i sedre u Nacionalnom parku Plitvička jezera, Zbornik radova 50 godina Nacionalnog parka Plitvička jezera. Društvo za zaštitu Plitvičkih jezera, Zagreb

Petrik, M. (1958) Prinosi hidrologiji Plitvica, Poljoprivredni nakladni zavod, Zagreb, Croatia

Pevalek I. (1958): Biodinamika Plitvičkih jezera i njena zaštita, Nacionalni park Plitvička jezera, Zagreb,

Poje, D. (1989): Pregled klimatskih karakteristika Nacionalnog parka Plitvička jezera. Plitvički bilten, br. 2

Polšak, A. (1959): Geološko istraživanje okolice Plitvičkih jezera. Ljetopis JAZU, 63, Zagreb

Polšak, A. (1969): Geološka karta Plitvičkih jezera, M 1 : 50 000. Kartografski laboratorij Geodetskog fakulteta, Arhiv PMF Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

Polšak, A., Šparica, M., Crnko, J., Juriša, M. (1967): Osnovna geološka karta SFRJ M 1 : 100 000. List Bihać, L 33-116. Karta i Tumač. Arhiv Hrvatskog geološkog instituta, Zagreb

Ridanović, J. (1976): Hidrogeografske značajke Nacionalnog parka Plitvička jezera. Geografski glasnik, Zagreb

Roglić, J. (1951): Unsko-koranska zaravan i Plitvička jezera - geomorfološka promatranja. Geografski glasnik 13, Zagreb

Roglić, J. (1974): Morfološke posebnosti Nacionalnog parka Plitvička jezera. Plitvička jezera – čovjek i priroda, Zagreb

Srdoč, D., Horvatinčić, N., Obelić, B., Krajcar, I., Sliepčević, A. (1985): Procesi taloženja kalcita u krškim vodama s posebnim osvrtom na Plitvička jezera. Krš Jugoslavije 11/4 – 6, JAZU

Srdoč, D., Obelić, B., Horvatinčić, N., Krajcar Bronić, I., Marčenko, E., Merkt, S., Wong, H., Sliepčević, A. (1986): Radiocarbon dating of lake sediments from two karstic lakes in Yugoslavia. Radiocarbon 28,

Srebrenović, D. (1986): Primjenjena hidrologija. Tehnička knjiga, Zagreb

Stilinović, B., Futač, N. (1985): Prilog poznavanju sanitarne vrijednosti vodenih sustava Plitvičkih jezera. Ekologija, vol. 20 (1), Acta Biologica Iugoslavica, Beograd

Stilinović, B., Futač, N. (1989): Prilog poznavanju sanitarne vrijednosti nekih opskrbenih voda i jezera na području Nacionalnog parka Plitvice od 1977. do 1986. godine. Plitvički bilten

Stilinović, B., Habdija, I., Dujmović, A. (2004): Kakvoća vode ekosustava Plitvičkih jezera od godine 1977. do 2003. temeljem bakterioloških analiza. Plitvički bilten

Sumina, P. (1988): Izvještaj o mjerenjima protoke vode na slivu Plitvičkih jezera radi utvrđivanja gubitaka u razdoblju od 1979. do 1988. godine. Arhiv DHMZ, Zagreb

Velić, I., Bahun, S., Sokač, B., Galović, I. (1970): Osnovna geološka karta SFRJ, M 1 : 100 000, list Otočac, L 33-115. Karta i Tumač. Arhiv Hrvatskog geološkog instituta, Zagreb

Vurnek, M., Brozinčević, A., Bušelić, G., Zwicker Kompar, G., Rubinić, J. (2010): Intra-Annual Dynamics of Water Quality Changes in Plitvice Lakes Spring Zone. U: Morell, M., Popovska, C., Morell, O., Stojov, V (ur.): BALWOIS 2010 Abstracts, May 2010, Ohrid, Macedonia

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Marušić, J., Poje, D. (1986): O klimi Plitvičkih jezera. Plitvički vjesnik, br. 109

Žugaj, R. (2003): Regionalna hidrološka analiza. U: Žugaj, Ranko (ur.): Seminar Praktična hidrologija, Zbornik radova. Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb

PRIMJENA SLUG TESTA U FORMACIJAMA VISOKE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI

ANALYSIS OF SLUG TESTS IN FORMATIONS OF HIGH HYDRAULIC CONDUCTIVITY

Matija Bedovec¹, Kristijan Grabar², Stjepan Strelec^{1*}

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42 000 Varaždin, Hrvatska

² SPP d.o.o. Varaždin, Trstenjakova 3, 42 000 Varaždin, Hrvatska

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

Sažetak: U radu je dan teorijski i praktični prikaz metode Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti. Opisuje se pojam Slug testa, te su prikazane njegove prednosti u odnosu na druge terenske metode. Prikazan je općeniti pregled postupka analize slug testa na terenu te su objašnjeni koraci od kojih se analiza sastoji. Objašnjenje postupka analize potkrijepljeno je grafovima koji su dobiveni na temelju podataka in situ mjerenjem. U nastavku se detaljno opisuje primjer terenske primjene Slug testa na lokaciji crpilišta "Varaždin", postupak izvođenja te korištena terenska oprema. Nakon opisivanja terenske primjene Slug testa navode se postupci obrade dobivenih podataka na terenu. Obrada podataka i njihova usporedba izvedena je u programu MS Excel i u programskom paketu AQTESOLV.

Ključne riječi: Slug test, formacije visoke hidraulička vodljivost, vodonosni sloj, pretvornik tlaka, parametar prigušenja C_D

Abstract: The purpose of this report is to describe a theoretical and practical presentation for two simple approaches for analysis of slug tests in formations of high hydraulic conductivity. It describes the concept of slug test, and shows the benefits of slug test compared to other field methods. Both approaches involve the graphical matching of theoretical type curves to plots of slug-test response data. The first approach is a spreadsheet-based procedure using the Excel software package and their comparison with software package AQTESOLV. Explanation of slug test analysis procedure is supported by graphs which are obtained in situ measurements at the site of the pumping station "Varazdin".

Keywords: Slug test, formations of high hydraulic conductivity, aquifer, pressure transducer, damping parameter C_D

Received: 23.11.2016 / Accepted: 10.12.2016

Published online: 14.12.2016

Prethodno priopćenje / Preliminary communication

1. UVOD

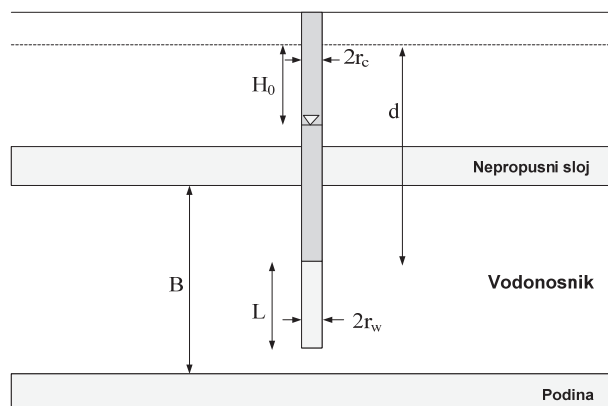
Kvalitetni podaci o hidrauličkim karakteristikama vodonosnih slojeva dobivaju se isključivo preko terenskih radova. Laboratorijska mjerenja nude raspon očekivanih podataka koji traže potvrdu dobiveni In-situ ispitivanjima. Često podaci dobiveni u laboratoriju nemaju poveznicu s podacima dobivenim na terenu. Probno crpljenje kao klasični postupak daje pouzdane rezultate, ali nije prikladan kao izvor okvirnih podataka kod planiranja ili manjih zahvata i to uglavnom zbog dugog trajanja pokusa i cijene izvođenja radova. Slug test može ponuditi mnogo točnije podatke od onih dobivenih u laboratoriju, tako dobiveni rezultati vrlo blizu su podacima dobivenim probnim crpljenjem. Test se izvodi u piježometarskoj bušotini, što pridonosi niskoj cijeni koštanja takvog pokusa, budući nije potrebno pokusno crpljenje ni dodatni opažački piježometar. Mnogi autori nudili su teorijska rješenja i uglavnom tražili rješenja u izgledu odziva (kolebanja) razine vode u piježometarskoj bušotini na unesenu promjenu naglim dodavanjem ili oduzimanjem dijela vode iz piježometra. Terenska ekipa sa prikladnom opremom za slug test, prijenosnim računalom i kvalitetnom aplikacijom, koja može biti izrađena i u MS Excelu, može za manje od

60-tak minuta imati rezultate o hidrauličkoj provodljivosti (K) i transmitivnosti (T) ispitivanog vodonosnog sloja zatvorenog ili otvorenog tipa. Zbog ovih činjenica Slug test je u svijetu, naročito u SAD-u vrlo često korištena metoda za određivanje hidrauličke vodljivosti. Koliko je poznato autorima ovog članka ova metoda u Hrvatskoj još nije korištena. Svrha ovog rada je predstaviti stručnoj javnosti Slug test radi veće mogućnosti korištenja istog u nekoherentnim tlima visoke hidrauličke vodljivosti.

2. SLUG TEST

Sva istraživanja podzemnih voda, trebaju imati procjenu propusnosti podzemnih slojeva tla, što je i fokus ovog istraživanja. U posljednja dva desetljeća, terenska istraživanja za ocjenu hidrauličke vodljivosti tla na mjestu istraživanja (in-situ) poznata kao Slug test su postala sve više popularna. Osobito među znanstvenicima i inženjerima koji rade na područjima gdje je došlo do onečišćenja podzemne vode koja je podvrgnuta ispitivanjima.

U tehničkoj literaturi mogu se pronaći mnogi članci o teorijskim modelima za analizu podataka dobivenih Slug testom, međutim relativno malo se objavljuje kako u praksi primijeniti tehnike Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti.



Slika 1. Parametri potrebni za izračun hidrauličke vodljivosti kod slug testa (AQTESOLV for Windows)

Parametri dobiveni slug testom mogu se koristiti za različite svrhe. Na pojedinim lokacijama gdje se sumnja na onečišćenost podzemnih voda, moguće je koristiti testne procjene kako bi se moglo predvidjeti potpovršinsko kretanje onečišćivala. Pomoću tih informacija moguće je planiranje testova crpljenja na više lokacija pijezometarskih bušotina. Na taj način dobivamo pouzdane informacija u svezi hidrauličkog ponašanja vode u tlu na velikim podpovršinskim jedinicama od interesa.

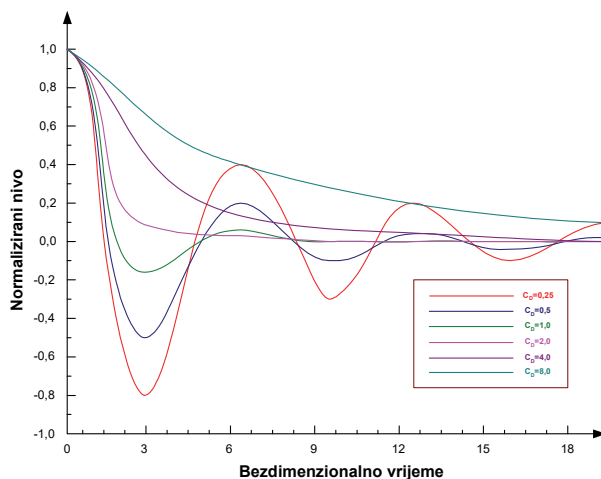
Prilikom istraživanja u svrhu vodoopskrbe, procjene dobivene putem Slug testova primarno se koriste za oblikovanje testova crpljenja na velikim površinama, kao i za procjenu učinkovitosti kod planiranja bušotina i aktivnosti u promatranim bunarima. Kod primjene ove metode u slojevima koji su ispod razine podzemne vode moguće je kvalitetno putem slug testa odrediti parametre vodonosnika.

2.1. Općeniti pregled postupka analize

Općeniti pristup prilikom obrade i analize podataka dobivenih testiranjem u visoko propusnoj geološkoj formaciji je sličan, bez obzira da li će test bio proveden u otvorenom ili zatvorenom vodonosniku. Ovaj pristup sastoji se od četiri koraka:

- Očitane vrijednosti sa senzora koji mjeri hidrostatski tlak vodnog stupca u pijezometru ucrtaju se u vremenski dijagram počevši od nekog dogovornog vremena. Iz tog dijagrama odredimo vrijeme početka testa i statičku razinu vode u pijezometru. Dijagram sa mjerenim vrijednostima prikazan je na slici 8 i 9. Zatim je potrebno iz dijagrama kolebanje razine vode prikazati kao odstupanje od nultog položaja (statičke razine vode $RPV=0$), odnosno početak testa označiti kao nulto vrijeme, $t = 0$, slika 10.

- Korištenje dijagram teoretskih krivulja. Krivulje su u obliku grafova normaliziranih odnosa razine vode od statičkog nivoa sa vremenom koji je bez dimenzije, slika 2. Ista grupa krivulja koristi se za analize otvorenih i zatvorenih vodonosnih formacija. Tipске krivulje generirane su prema jednadžbama 1, 2 i 3. (Butler 1997; Butler & Garnett 2000; Zlotnik 1994).



Slika 2. Tipске krivulje (Butler 1997)

Isti skup krivulja koristi se za analizu rezultata testiranja u otvorenim i zatvorenim vodonosnicima. Ovdje primijenjeni tipovi krivulja izvedeni su iz metode prigušenja, područja klasične fizike:

$$w_d(t_d) = e^{-\frac{C_D}{2}t_d} \cdot \left[\cos(\omega_d \cdot t_d) + \frac{C_D}{2\omega_d} \sin(\omega_d \cdot t_d) \right], \dots, C_D < 2 \quad (1)$$

$$w_d(t_d) = e^{-t_d} (1 + t_d), \dots, C_D = 2 \quad (2)$$

$$w_d(t_d) = -\left(\frac{1}{\omega_d^+ - \omega_d^-} \right) \cdot \left[\omega_d^- \cdot e^{\omega_d^+ t_d} - \omega_d^+ \cdot e^{\omega_d^- t_d} \right], \dots, C_D > 2 \quad (3)$$

gdje je:

C_D = parametar prigušenja,

g = ubrzanje izazvano gravitacijskom silom [m/s^2],

H_0 = promjena razine vode koju je inicirao Slug test (inicijalni pomak) [m],

L_c = efekt. dužina vodnog stupca u pijezometru [m],

t_d = bezdimenzionalni vremenski parametar =

$$\sqrt{\frac{g}{L_e}} \cdot t$$

t = vrijeme [s],

w = odmak razine vode od statičke razine [m],

w_d = normalizirana devijacija razine vode [-] =

$$\left(\frac{w}{H_0} \right)$$

ω_d = bezdimenzionalni frekvencijski parametar =

$$\sqrt{\left| 1 - \left(\frac{C_D}{2} \right)^2 \right|}$$

$$\omega_d^\pm = -\frac{C_D}{2} \pm \omega_d \quad (4)$$

- c) Nakon toga se tipske krivulje superponiraju na dijagram dobiven mjerenjem Slug testa. Bezdimenzionalno vrijeme tipskih krivulja tada se isteže ili skuplja kako bi se postiglo preklapanje između odabrane C_D krivulje i mjerenih podataka. Izgled krivulja za različite parametre C_D vidljiv je sa **slike 2**. Istezanje odnosno kontrakcija odabrane C_D krivulje postiže se pomoću faktora modulacije koji je u osnovi broj s kojim se množi bezdimenzionalno vrijeme u C_D krivulji. Pomoću ova dva parametra (C_D i faktora modulacije) moguće je postići preklapanje matematičkih krivulja i mjerenih podataka koji su prikazani u normaliziranom obliku (w/H_0). Kada postignemo usklađenost krivulja, podatak koji je potrebno odrediti jeste vrijeme preklapanja (Butler & Garnett 2000). Ono se određuje na način da se očitaju vrijednosti realnog vremena t^* i bezdimenzionalnog vremena t_d^* za istu koordinatu na superponiranim krivuljama. Točka preklapanja tada je odnos (t_d^*/t^*).
- d) Hidraulička vodljivost procjenjuje se putem usklađivanja tipova krivulja. Radijalna hidraulička vodljivost (K_r) procjenjuje se supstitucijom vrijednosti za dobro ugođene parametre, C_D i omjera vremenske usklađenosti (t_d^*/t^*), unesenim u jednadžbu koja je prikladna za testne uvjete: Za otvorene vodonošne slojeve - visoka K_r vrijednost u skladu je sa modelom prema:

$$K_r = \frac{t_d^*}{t^*} \cdot \frac{r_c^2 \cdot \ln \left[\frac{R_c}{r_w} \right]}{2 \cdot b \cdot C_D} \quad (5)$$

Za zatvorene vodonošne slojeve vrijednost je u skladu s modelom prema:

$$K_r = \frac{t_d^*}{t^*} \cdot \frac{r_c^2 \cdot \ln \left[\frac{b}{2 \cdot r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2 \cdot r_w} \right)^2} \right]}{2 \cdot b \cdot C_D} \quad (6)$$

gdje je:

- b = dužina perforiranog dijela (filtra) [m],
 R_c = efektivni polumjer [m],
 r_c = efektivni polumjer pijezometra (ispravljen za polumjer kabla sonde) [m],
 r_w = radijus perforiranog dijela pijezometra [m]

3. PRIMJER TERENSKE PRIMJENE SLUG TESTA NA LOKACIJI VODOCRPILIŠTA „VARAŽDIN“

3.1. Izvedba pijezometra PDS-1

Pijezometra PDS-1 nalazi se u poluzatvorenom vodonošnom sloju. To znači kako je taj sloj dobro propustan sloj potpuno saturiran, a u njegovoj se krovini nalazi djelomično saturiran polupropusni sloj. Taj sloj ima slabu, ali ipak praktično mjerljivu propusnost. Snižavanje pijezometarske visine u poluzatvorenom vodonošnom sloju, uslijed crpljenja uzrokovat će vertikalno procjeđivanje iz polupropusnog medija gornji vodonošni sloj. Poluzatvoreni vodonošni sloj može pokazati razinu pod tlakom kao i slobodnu razinu podzemne vode.

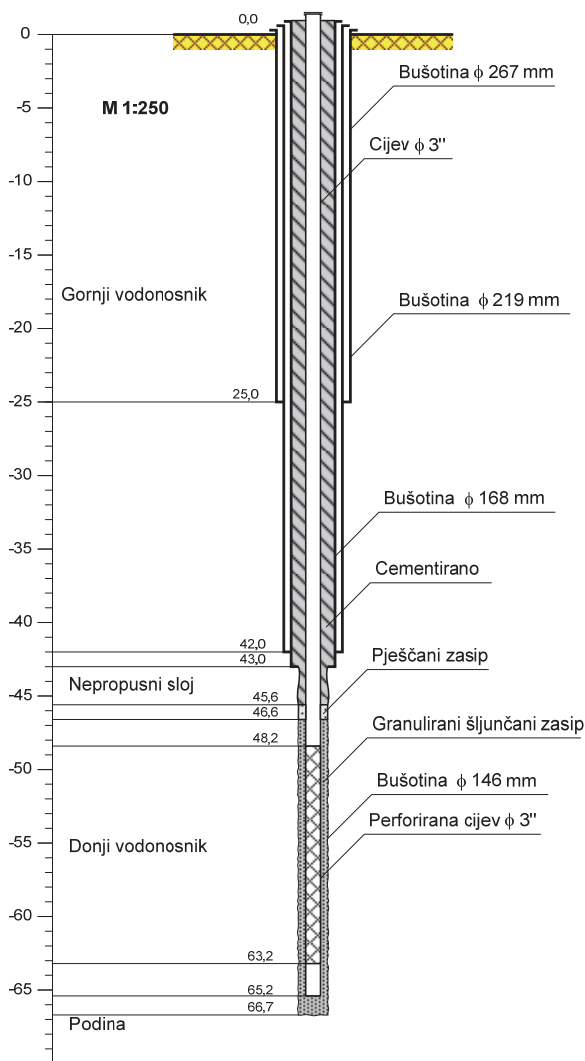
Pijezometar PDS-1 je podijeljen u tri dijela. Donji dio je taložnik ukupne visine 2 m, iznad njega se nalazi filtarski dio u duljini 15 m, a ostali dio je puna pocinčana cijev unutarnjeg promjera 3", **slika 3**.

Filtarski dio je perforirana pocinčana cijev promjera 3", perforacijom 4 mm i propusnosti oko 8%. Kako postoji mogućnost ulaska čestica kroz perforacije potrebno je dodatno osigurati propusnost samo za vodu. Stoga je filtarski dio dva puta omotan plastičnom milimetarskom mrežicom. Filtarski dio cijelom dužinom je u drugom vodonošnom sloju. Filtarski šljunčani zasip je veličine zrna od 1 do 4 mm. Pijezometar PDS-1 nalazi se 30,83 m udaljen od zdenca Z-1. Naime, hidraulički utjecaj rada okolnih zdenaca, koji zahvaćaju gornji sloj, zanemariv je u odnosu na pijezometar PDS-1 i zdenac Z-1 koji zahvaćaju donji sloj. Konačno položaj pijezometra PDS-1 omogućuje povoljne uvjete za identifikaciju parametara vodonošnog sloja, a položaj zdenca prikladan je za olakšano uključivanje u vodoopskrbni sustav (Urumović et al. 2002).

3.2. Oprema potrebna za izvođenje Slug testa

Oprema za mjerenje sastojala se od:

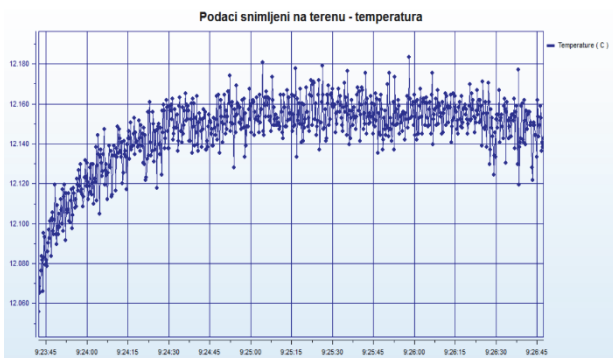
1. Sonde modela "Level TROLL 700" (**slika 4**) koja daje kvalitetne podatke Slug testa u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti (uzorkovanje svakih 250 ms), omogućuje kontinuirano praćenje razine vode, tlaka i temperature vode. Titanska građa sonde omogućuje dugotrajna radna svojstva u svježoj, slanoj pa čak i onečišćenoj podzemnoj vodi, s baterijom niske potrošnje koja traje 10 i više godina.
2. Računalo sa instaliranim Win-Situ 5 aplikacijom, koja omogućuje izravno čitanje i profiliranje podataka, dugotrajno bilježenje i preuzimanje te online pregledavanje. Zatim izvoz podataka u proračunske tablice Microsoft Excel programa. Poznati volumen cilindra koji se koristio za Slug test zapremine je $V_s = 1,36$ l, promjera 45 mm i dužine 852 mm. Izgled i dimenzije cilindra za Slug test dan je su na **slici 6**.



Slika 3. Tehnički profil pijezometra PDS-1



Slika 4. Sonda modela "Level TROLL 700"



Slika 5. Win-Situ 5 softver (podaci o temperaturi vode dobiveni terenskim ispitivanjem na lokaciji crpilišta „Varaždin“ 31.5.2016.)



Slika 6. Cilindar za potrebe Slug testa

3.3. Izvođenje slug testa na terenu

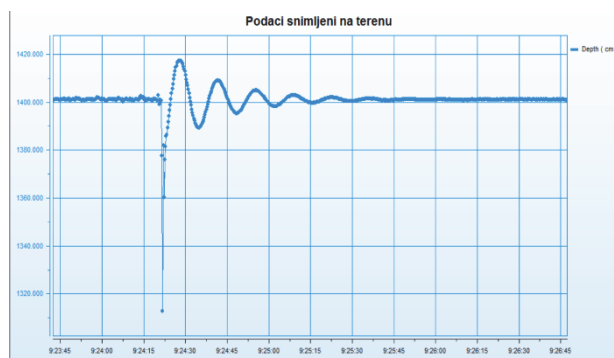
Mjerna sonda (Level TROLL 700) spuštena je u pijezometar PDS-1 do dubine od 14,01 m ispod razine vode u pijezometru.

Slug test proveden je naglim izvlačenjem slug objekta, slika 7, pri čemu je zabilježeno osciliranje nivoa vode u pijezometru.

Sonda je bilježila izmjerene vrijednosti svakih 250 ms u određenom vremenskom periodu, dok se razina vode nije vratila u inicijalno stanje, što je vidljivo sa slike 8.



Slika 7. Spuštanje sonde u pijezometar i izvlačenje slug šipke



Slika 8. Zapis mjernih vrijednosti u softveru Win-Situ 5 na lokaciji crpilišta „Varaždin“ (ispitivanje je izvedeno 31.5.2016.)

3.4. Aplikacija proračuna u MS Excelu

Očitane vrijednosti sa senzora koji mjeri hidrostatski tlak vodnog stupca u pijezometru, ucrtaju se u vremenski dijagram počevši od nekog dogovorenog vremena. Iz tog dijagrama odredi se vrijeme početka testa i statička razina vode u pijezometru. Dijagram sa mjerenim vrijednostima prikazan je na slici 9.



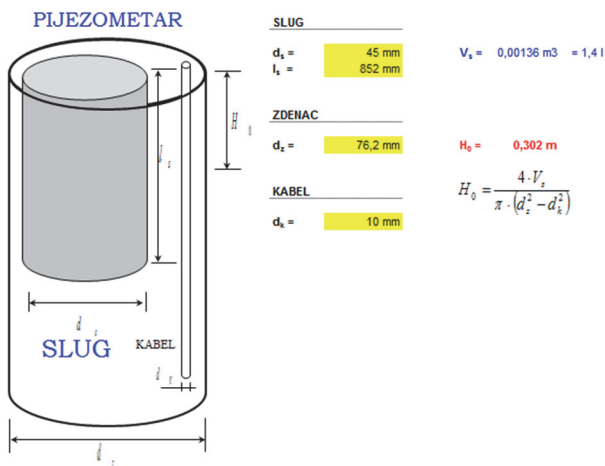
Slika 9. Podaci zabilježeni sondom Level TROLL

Sljedeći korak je kolebanje razine vode iz dijagrama na slici 9. prikazati kao odstupanje od nultog položaja (statičke razine), odnosno početak testa označiti kao nulto vrijeme, $t = 0$, (Slika 10). To se postiže oduzimanjem statičkog vremenskog potencijala od ostalih izmjerenih vrijednosti potencijala.



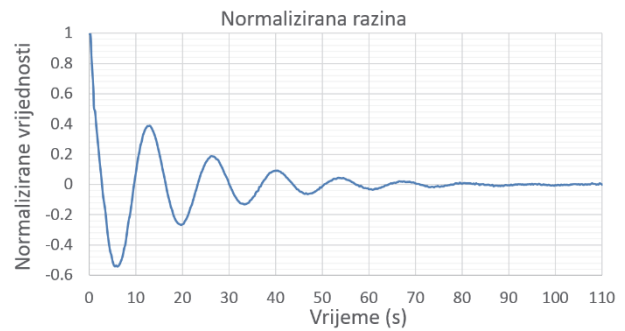
Slika 10. Relativizirani podaci

Kako je to čest slučaj u slug analizama i ovdje je potrebno pomak od nultog položaja normalizirati za vrijednost inicijalnog pomaka prouzročenog izvlačenjem sluga iz pijezometra. Prema proračunu po izrazima sa slike 11 inicijalni pomak je $H_0=0,302$ m, slika 10.



Slika 11. Proračun inicijalnog pomaka razine vode H_0

Dobiveni relativizirani podaci dijele se sa inicijalnim pomakom (H_0) koji je uzrokovan izvlačenjem sluga, kako bi se dobile normalizirane vrijednosti za iznos inicijalnog odmaka $H_0 = 0,302$ m, slika 12.



Slika 12. Normalizirane vrijednosti za iznos inicijalnog odmaka $H_0=0,302$ m

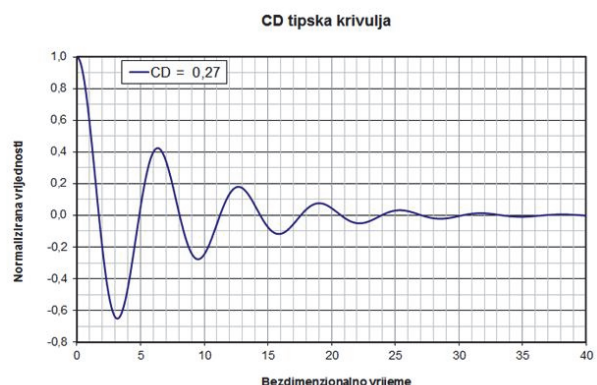
3.4.1. Primjena proračunskih tablica

Radi automatizacije proračuna i brzine izvođenja izrađen je obrazac u programu Microsoft Excel koji zadovoljava potrebe proračuna. Procedura nije u potpunost automatizirana jer je potrebno ručno mijenjanje parametara C_D i faktora modulacije tipskih krivulja dok se vizualno ne poklopi sa krivuljom mjerenih podataka. Na slici 13 prikazan je dio Excel tablice “Slug test u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti“. Vrijednost C_D , za koju se crta tipizirana krivulja, unosi se u C_D polje. Zatim se računaju teoretske normalizirane vrijednosti u stupcu H, u ovisnosti o C_D vrijednostima koriste se izrazi (jednadžbe) 1 ($C_D < 2$), 2 ($C_D = 2$) ili 3 ($C_D > 2$).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		C_D	omega	omega*	omega-		bezdimezionalno vrijeme	$C_D =$	
2		0.27	0.9908	0.8558	-1.1258			0.27	
3							0	1.0000	
4							0.1	0.9950	
5							0.2	0.9804	
6							0.3	0.9565	
7							0.4	0.9238	
8							0.5	0.8829	
9							0.6	0.8343	
10							0.7	0.7789	
11							0.8	0.7172	
12							0.9	0.6501	
13							1	0.5784	
14							1.1	0.5028	
15							1.2	0.4244	
16							1.3	0.3438	
17							1.4	0.2620	
18							1.5	0.1798	
19							1.6	0.0980	
20							1.7	0.0175	

Slika 13. Generator tipске krivulje

Za $C_D=0.27$ tipске krivulje, prema izrazu 3 izračunavaju se normalizirane vrijednosti u funkciji bezdimezionalnog vremena (slika 14.).



Slika 14. Normalizirane vrijednosti za $C_D = 0.27$

Slika 15. pregledni je prikaz ulaznih podataka u MS Excel programu. Podaci o vremenu i kolebanju razine unose se u stupce C i D, podaci iz slike 9 te se dobiva dijagram prikazan na slici 12. Vrijednost C_D (slika 13, polje B2) mijenjamo dok se ne poklope vrijednosti kolebanja dobivene Slug testom na vodocrpilištu "Varaždin" sa jednom C_D tipskom krivuljom iz slike 2. U ovom slučaju do najboljeg preklapanja došlo je kod vrijednosti $C_D = 0.27$, slika 16.

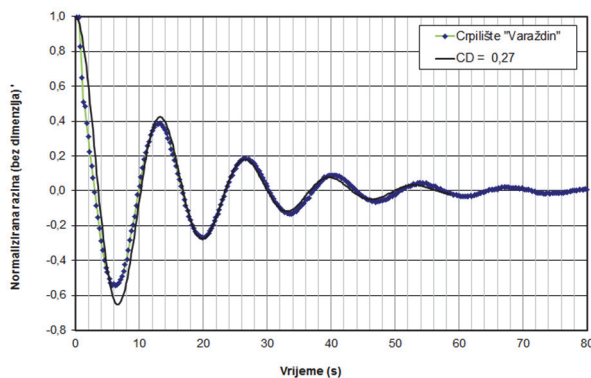
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	DIPLOMSKI RAD										
2	Podaci o pijeozmetru - "d" se ne koristi u zatvorenom vodonosniku										
3	Dubina do dna filtra (od vha pijeozmetra) 63.2 m										
4	Duljina filtra (b) 15.000 m										
5	Osnovni podaci o pokusu										
6	Dubina do statičke razine (od vha pijeozmetra) 8.01 m										
7	Udaljenost vha filtra do statičkog nivoa (d) 40.19 m										
8	Unutrašnji polumjer filtra (r_w): 0.038 m										
9	Vanjski polumjer pijeozmetske cijevi (r_{cs}): 0.041 m										
10	Polumjer kabla sonde (r_{cs}): 0.005 m										
11	Dubina sonde: 14.01 m										
12	efektivni polumjer pijeozmetra ($r_e = (r_{cs}^2 + r_w^2)^{0.5}$): 0.041 m										
13	Modificirani polumjer filtra (r_w^*): 0.038 m										
14	Statička razina vode: 7.95 m										
15	odnos (b/r_w^*): 394.737										
16	Inicijalni pomak (H_0): -0.302 m										
17	Početak testa: 39.5 sec										
18	debljina formacije vodonosnog sloja (B): 18.6 m										
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											

Slika 15. Pregledni prikaz proračunskih tablica

Određivanje prikladnog tipa krivulje (C_D) dobiva se putem iterativnog postupka mijenjanjem vrijednosti u tablici „generator tipskih krivulja“ (slika 13) tako dugo dok se vrijednosti teoretskih i dobivenih vrijednosti Slug testom kvalitetno ne poklope u fazama.

Kako bi se ostvarilo usklađivanje vrijednosti po visini (amplitude oscilacija), bezdimenzionalno vrijeme podešava se korištenjem faktora modulacije. Mijenjanjem faktora modulacije automatski se crta teoretska tipska krivulja za vrijednosti $C_D = 0.27$ tako dugo dok se ne poklope mjerena i teorijska krivulja i po visinama, slika 16.

Vremensko podešavanje iterativno se nastavlja sve dok se ne dobije prikladna sukladnost krivulja. Prilikom ugađanja izračunavaju se omjeri vremena pri točkama ugađanja (t_d/t^*). Kada se postigne prikladna sukladnost krivulja program izračuna vrijednost hidrauličke vodljivosti koja u ovom slučaju iznosi $K=50,89$ m/dan, slika 17. Glavni nedostatak je ručno izvođenje iterativnog postupka u navedenim ćelijama.



Slika 16. Prilagodba tipske krivulje na mjerene podatke

R	S	T	U	V
Zatvoren vodonosnik - High-K Hvorslev Model				
$K_r =$	$t_d^* r_c^2 \ln[b/(2r_w^*) + (1 + (b/(2r_w^*))^2)^{0.5}]$			
	$t^* 2bC_D$			
$K_r = 0.00059$ m/sec				
50.898 m/day			1.67E+02 ft/day	
0.0589 cm/sec				

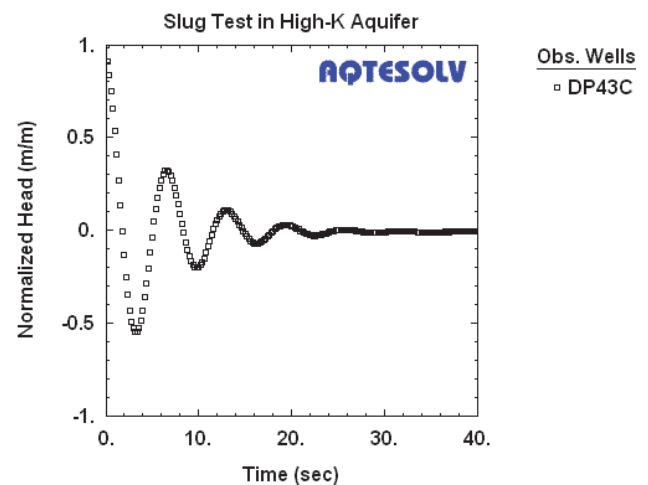
Slika 17. Rezultat hidrauličke vodljivosti

3.5. Aplikacija proračuna u AQTESOLV programskom paketu

AQTESOLV softver namijenjen je za izračunavanje hidrauličke vodljivosti, transmisivnosti, koeficijenta uskladištenja i drugih parametara vodonosnika na temelju podataka dobivenih tijekom izvođenja slug testova i testova crpljenja (step test, recovery test).

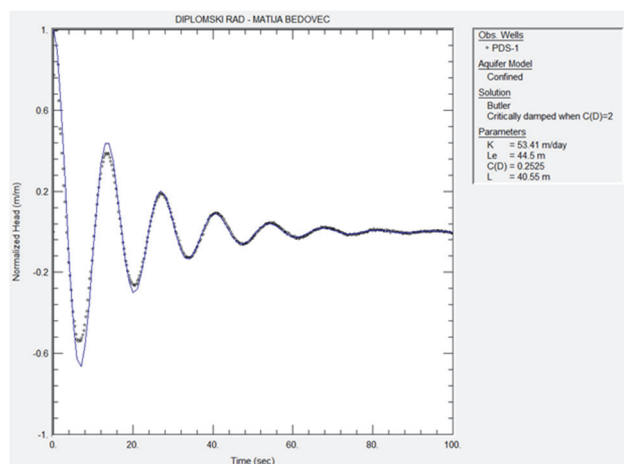
U AQTESOLV podaci se najčešće prenose direktno spajanjem pretvornika hidrostatskog tlaka (sondom) preko USB porta, no mogu se unositi i ručno.

Nakon unosa dobivenih podataka mjenjenih na terenu isti se prikazuju grafički radi lakšeg razumijevanja. Nakon što su podaci uneseni, softver nudi niz rješenja raznih autora za određene tipove vodonosnika izračun hidrogeoloških parametara. Znanje korisnika softvera od izuzetne je važnosti kako bi se odabralo najprikladnije rješenje problema. AQTESOLV daje smjernice u odabiru odgovarajućeg rješenja, a korisnik se upućuje na odgovarajuću literaturu za detalje o svakom pojedinom rješenju. Na slici 18 vidljiv je prikaz podataka Slug testa.



Slika 18. Prikaz podataka dobivenih Slug testom, u softveru AQTESOLV

Uvažavajući sve upute i nakon unošenja svih potrebnih podataka, softver iscrtava krivulju koja predstavlja podatke dobivene izvođenjem Slug testa i njenu pripadajuću normaliziranu vrijednost, za iznos inicijalnog odmaka, u našem slučaju $H_0=0,302$ m, **slika 19**. Za računanje hidrauličke vodljivosti potrebno je odabrati odgovarajuće rješenje koje nudi program AQTESOLV. U ovom slučaju, odabrano je rješenje prema Butleru. Kao i kod proračuna u Excelu, provodilo se usklađivanje krivulje koja predstavlja podatke dobivene izvođenjem Slug testa i teoretske krivulje. Vremensko podešavanje iterativno se nastavlja sve dok se ne dobije prikladna sukladnost krivulja, **slika 19**. Kada se krivulje preklope, program izračuna vrijednost hidrauličke vodljivosti (K), koja u ovom slučaju iznosi $K=53,41$ m/dan. Prednost ovog programa je što se iteracije izvode automatski.



Slika 19. Prilagodba teoretske krivulje na podatke

4. REZULTATI MJERENJA

Probno crpljenje zdenca Z-1 na vodocrpilištu "Varaždin", izveo je 2002. godine Građevinski Fakultet - Zavod za hidrotehniku prema Hantushovoj metodi (Urumović et al. 2002). Podaci dobiveni probnim crpljenjem zdenca hidrauličke vodljivosti te vrijednosti dobivene Excel proračunskom tablicom i aplikacijom AQTESOLV dani su u **tablici 1**.

Tablica 1. Rezultati mjerenja

Podaci dobiveni Slug testom		Podaci dobiveni probnim crpljenjem
Excel tablice	AQTESOLV	Građevinski Fakultet
$K=50,90$ m/dan $= 5.9 \times 10^{-4}$ m/s	$K=53,41$ m/dan $= 6.1 \times 10^{-4}$ m/s	$K=74$ m/dan $= 8.5 \times 10^{-4}$ m/s

Kod probnih crpljenja i opažanja sniženja u bunaru i promatranom pijezometru prema raznim autorima te vrijednosti često variraju i u većim granicama.

Za razliku od višednevnih pokusnih crpljenja provedbu i analizu Slug testom moguće je izvesti u 60-tak minuta te

on u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti zaslužuje više pozornosti i praktične upotrebe na terenu.

5. ZAKLJUČAK

Tijekom godina razvijen je velik broj eksperimentalnih tehnika za procjenu hidrauličke vodljivosti podzemnih slojeva tla. U posljednje vrijeme, sve se više primjenjuju terenska istraživanja za ocjenu hidrauličke vodljivosti tla poznata pod nazivom Slug test. Ispitivanje hidrauličke vodljivosti Slug testom je relativno brzo, metoda je jednostavna za izvođenje a cijena ispitivanja je prihvatljiva za sve vrste korisnika. Kod Slug testa nisu moguće greške kod mjerenja budući izazvanu oscilaciju mjere sofisticirani pretvornici s uzorkovanjem manjim od sekunde (u našem slučaju 250 ms, sonda od titana). Testovi su ponovljivi te izvođenje Slug testa u istom pijezometru daje uvijek iste rezultate vremena trajanje poremećaja te iste krivulje prigušenja oscilacija podzemne vode. Na pijezometru PDS-1 izvedena su više mjerenja i sva su bila identična. Metoda je verificirana i potvrđena te implementirana u aplikaciji AQTESOLV prije par godina, kao ravnopravna metoda za određivanje parametra za različite vrste vodonosnika u formacijama visoke hidrauličke vodljivosti. Također treba naglasiti kako za odabrani tip vodonosnika različite aplikacije prema raznim autorima nude više opcija rješenja. Često se tako dobivene vrijednosti hidrauličke vodljivosti razlikuju i više od 50 %, no ako vrijednosti za K izrazimo u m/s (SI sustav) i dobijemo izračune s istim eksponentom, možemo ih smatrati prihvatljivim za inženjersku praksu. U našem slučaju iz tablice 1 svi eksponenti imaju vrijednost $\times 10^{-4}$.

Pijezometar PDS-1 nije čišćen air-liftom više od 10 godina. Kvalitetnim čišćenjem vjerojatnije bi se povećale vrijednosti hidrauličke vodljivosti dobivene Slug testom te samim time i smanjile razlike između vrijednosti K dobivene probnim crpljenjem.

Ovaj rad ima namjeru približiti i prikazati razumljivijim Slug test te pokazati njegovu primjenu kao In-situ test koji za manje zahtjeve može zadovoljiti i kao konačni podatak. Koristeći formule iz ovog članka izrađena je aplikacija i u MS Excelu koja daje rezultate kao i AQTESOLV, ali i kvalitetniji grafički prikaz.

6. LITERATURA

AQTESOLV for Windows, developed by Glenn M. Duffield, HydroSOLVE Inc (2016).

Butler, J. J. Jr. (1997). The Design, Performance and Analysis of Slug Tests. Kansas Geological Survey, University of Kansas

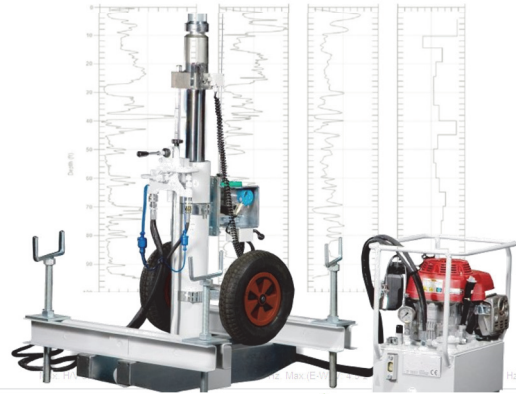
Butler, J. J. Jr., Garnett, E. J. (2000). Simple Procedure for Analysis of Slug Test in Formations of high hydraulic conductivity. Kansas Geological Survey, University of Kansas

Zlotnik V. (1994). Interpretation of Slug and Packer Tests in Anisotropic Aquifers. National Ground Water Association

Urumović, K., Hlevnjak, B., Andročec, V., Duić, Ž. (2002). Elaborat, ZDENAC Z-1, crpilište "Varaždin" – zahvat podzemne vode iz donjeg vodonosnika. Zagreb



ZAVOD ZA GEOTEHNIKU GEOFIZIČKO-GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADovi



GEOFIZIČKI ISTRAŽNI RADovi

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



GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADovi

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

RENEWABLE ENERGY IN MEXICO: DEVELOPMENT AND OUTLOOK OF PHOTOVOLTAIC (PV) ENERGY

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE U MEKSIKU: RAZVOJ I PRIKAZ FOTONAPONSKE (PV) ENERGIJE

José G. Vargas-Hernández¹, Mohamed EL-Shimy², Arturo Córdova Rangel³, Lucija Nađ^{4*}

¹ Emmanuel Rodolfo Ascencio Espinosa. Centro Universitario de Ciencias Económica y Administrativas, Universidad de Guadalajara. Periférico Norte 799, Núcleo Universitario Los Belenes. Zapopan, Jalisco, C.P. 45100, Mexico

² Professor of electrical power systems. Electrical Power and Machines Department. Ain Shams University. 1 EL-Sarayt Rd. Abdo-Basha Sq. Abbassia, 11517, Cairo, Egypt

³ Universidad Politécnica de Aguascalientes. Calle Paseo San Gerardo No. 207, Fracc. San Gerardo. Aguascalientes, Ags., C.P. 20342, Mexico

⁴ Environmental engineering, Geotechnical faculty of the University of Zagreb. Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Croatia

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

Abstract: From the energy resources point of view, Mexico has an advanced worldwide rank in the availability of fossil resources as well as renewable energy resources. The major abundant conventional resources are oil and natural gas while the abundant renewable energy resources include solar, wind, hydro, geothermal, and biomass. Due to the geographical and topological conditions of Mexico, the meteorological conditions of various locations in Mexico are significantly location-dependent. In addition, the potential of the major renewable energy resources (i.e. wind, solar, and hydro) is neither fully explored nor exploited. With a focus of solar-PV energy, this paper analyzes the renewable energy industry in Mexico and investigates the most suitable way for promoting the public policies and finding the absolute advantages. In doing so, the international theories and experiences are considered as a development guide. International experiences show that it is possible to establish 'green energy' markets in which the end users cover their costs. These emerging markets are identified to be highly profitable for both sides i.e. the energy provider and the energy consumers. It can also be seen that government programs are available for supporting these markets; a fact that makes the green energy alternatives tempting for the investment of national and international firms. Some of the data presented in the presented study are based on techniques such as Herfindal-Hirshman Concentration Index (HHI), Pascual concentration indices and game theory.

Keywords: Mexico, Renewable Energy, Photovoltaics, Green Energy Markets, Development.

Sažetak: Sa stajališta izvora energije, Meksiko je u samom svjetskom vrhu u dostupnosti klasičnih izvora energije, kao i obnovljivih izvora energije. Glavni klasični izvori su nafta i prirodni plin, dok izvori obnovljive energije uključuju energiju sunca, vjetra, hidroenergiju, geotermalnu energiju i biomasu. Zbog geografskih i topografskih uvjeta Meksika, meteorološki uvjeti na raznim lokacijama u Meksiku znatno ovise o lokalnim uvjetima. Osim toga, potencijal glavnih obnovljivih izvora energije (tj. vjetra, solarne i hidro) niti je u potpunosti istražen, niti iskorišten. S naglaskom na solarnu PV energiju, u ovom radu analizira se korištenje obnovljive energije u Meksiku te se istražuje najprikladniji način za promoviranje smjernica daljnjeg razvoja i pronalaženje apsolutnih prednosti obnovljivih izvora energije. Na taj način, međunarodne smjernice i iskustva smatraju se kao dobar vodič za razvoj. Međunarodna iskustva pokazuju da je moguće uspostaviti tržište 'zelene energije' u kojima krajnji korisnici pokrivaju svoje troškove. Takve vrste tržišta u nastajanju identificirana su kao vrlo unosna za obje strane tj. proizvođače energije i potrošače energije. Također se može vidjeti da su državni programi dostupni za podržavanje takvih tržišta; činjenica je da navedeno zelenu energiju čini primamljivom za ulaganja domaćih i međunarodnih tvrtki. Neki od podataka prikazanih u ovom radu temelje se na pokazateljima kao što su Herfindal-Hirshman Koncentracijski Index (HHI), Pascual-ov indeks koncentracije i teorije igara.

Ključne riječi: Meksiko, obnovljivi izvori energije, fotonaponski sustavi, tržište zelene energije, razvoj.

Received: 30.07.2016 / Accepted: 24.11.2016

Published online: 14.12.2016

Pregledni rad / Review paper

1. INTRODUCTION

Currently, the renewable energy (RE) sources occupy an increasing space in the energy landscape, and global economics. All developed countries and developing countries are changing their energy policies for the development of technologies that provide economic growth, and can meet the demands of its population. The technologies

that use renewable energy are currently experiencing the highest growth rate in the world.

Mexico is no exception of the international trend. Over the last decade till now, the energy reform led to the development of the energy sector.

Currently, there are 10 major private companies engaged in the production of renewable energy. The business of these companies with the Federal Electricity Commission (CFE) is as direct producers, and/or production equipment providers (also for individuals). Mexico has initiated a way to diversify fuels used in electricity generation for enhancing the energy mix.

The intensive use of fossil fuels has impacts on the energy security by the volatility of prices and availability of fuels. In addition, the use of fossil fuels degrades the environment and health due to the emission of greenhouse gases. Due to these reasons, Mexico (legislators and government) has recently developed various policies, laws, rules and regulations to promote the rational use of non-renewable resources and increase the implementation of energy sources that cause less environmental impact, such as renewable energy. In the latter context, it is found that the use of solar energy could play an important role.

Various energy planning documents developed and /or supported by several national and international organizations and actors (such as the Ministry of Energy (Secretaría de Energía), bilateral cooperation agencies, research centers, NGOs, associations and representatives of civil society and private industry) have highlighted the enormous potential for Mexico to take advantage of the solar resource. The proposed applications of the solar energy include heating and cooling applications as well as electricity generation.

In the case of electricity generation, international experiences show that PV systems require some form of intervention by the authorities conducting energy policy to overcome the obstacles and create a market that will accelerate their development.

2. OBJECTIVES

This paper analyzes the renewable energy industry in Mexico, specifically solar energy and photovoltaic (PV) technologies. Although it is a new industry and an emerging market in Mexico, it is a significantly growing market. Therefore, the renewable energy in Mexico can be considered as a potential business of a high economical viability. The period of analysis oscillates between 2000 and 2013.

This work focuses on the review and analysis of the renewable energy sectors from the points of view of the operation of the technologies, its applications, its current market, and their chronological development, and the foreign and national investment as well as the sale and production of the solar-PV equipment. The present study investigates these aspects using techniques such as Herfindal-Hirshman Concentration Index (HHI), Pascual concentration indices, and game theory.

The research questions are: What are the main features of the RE market in Mexico? What is the industry outlook considering development and production? And who are the major investment companies in the photovoltaic industry in Mexico?

3. BACKGROUND

According to the National Association of Solar Energy (ANES), until 2006, virtually the applications of solar-PV

systems installed in Mexico include off-grid applications, rural electrification, communications, and water pumping and cooling. However, from the year 2007 there are records of grid-connected applications. This trend has continued in subsequent years. For example, in 2011, 94% of the 3.5 MWp installed in that year were grid-connected. **Fig. 1** shows the evolution of the installed capacity and power generation with solar-PV systems in Mexico.

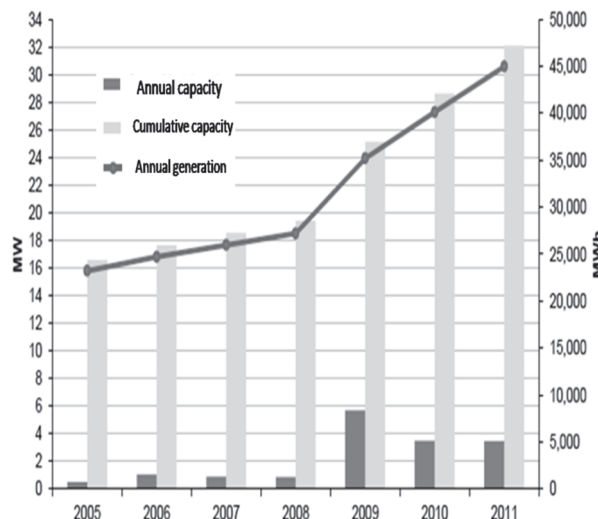


Figure 1. Evolution of the installed capacity and power generation with solar-PV systems in Mexico. (SENER2012)

As shown in the **Fig. 1**, the annual installed capacity (off-grid and grid-connected systems), shows a fluctuating behavior in the period 2005 – 2011; however, in cumulative terms, the installed capacity is increased from 16.5 MWp to 32 MWp while the annual electricity generation increased from 23,235 MWh in 2005 to 44,974 MWh in 2011. Therefore, the cumulative capacity and cumulative energy show increasing trend.

4. DESCRIPTION OF TECHNOLOGY

Till the middle of previous century, the use of solar energy to generate electricity materialized its first applications mainly during the early space race between the U.S. and the former Soviet Union. The phenomenon that is considered as the origin of photovoltaic was observed by first time over 100 years ago. This phenomenon is called 'photovoltaic effect'. **Fig. 2** illustrates the basic concepts of the photovoltaic effect. **Fig. 3** illustrates the construction of solar-PV arrays.

The solar-PV cell presents the main item. Cells are grouped together to form the solar-PV modules (or panels) which is the usually available commercial units. A solar-PV generator is constructed by externally connecting several modules by wires. Details about the development of photovoltaic materials, characteristics, and solar-PV generators for off-grid and grid-connected applications can be found in (EL-Shimy M, and Abdo T, 2014; and EL-Shimy M, Nov. 2015).

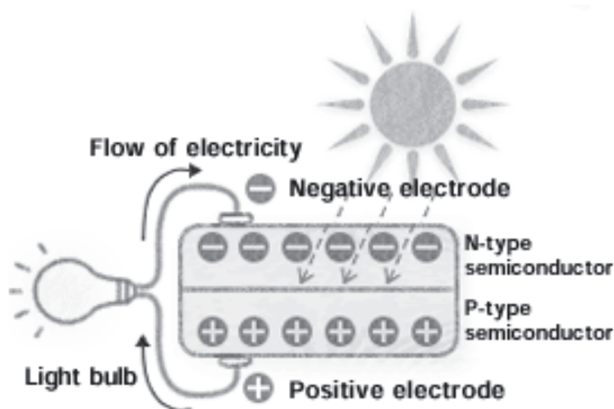


Figure 2. Main concepts of photovoltaics (Solar pool tech)

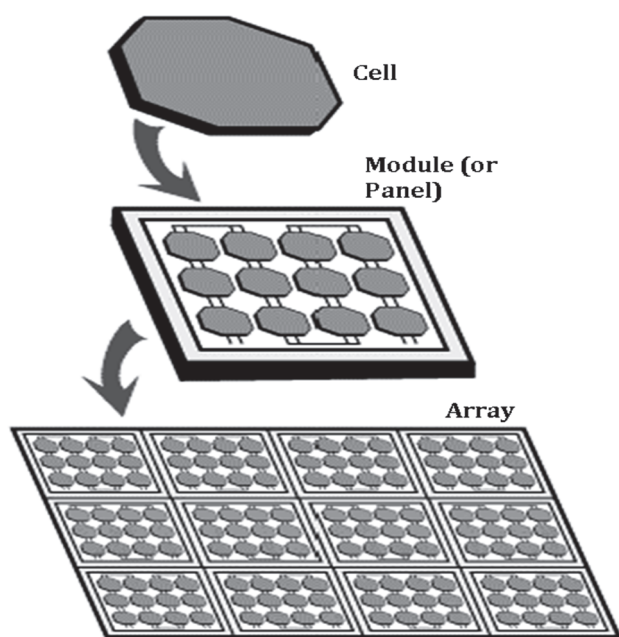


Figure 3. Assembly of a PV module (Organización Anes)

Since the CFE as well as other grids delivers AC electricity to their loads such as homes while the solar-PV modules produce DC electricity, inverters are needed for transforming the DC electricity to AC electricity as specified by the grid. It should be noted that the connection of a PV array with the grid requires other components such as power conditioning, filtering devices, metering instruments, and protection devices. Although the lifetime operation and maintenance (O&M) costs of solar-PV systems are low while their initial costs are significantly high in comparison with other power generation technologies. Therefore, the contribution of initial costs in the Levelized Cost of Energy (LCOE) is very high in comparison with the contribution of the O&M costs. Consequently the O&M costs are virtually null in comparison with the cost of electricity generation. From trend of costs point of view, it is found that the investment and the generation costs decline and it is expected that these costs continue to significantly decline.

Details about the modeling, and evaluation of the LCOE of solar-PV systems can be found in reference (Said M, EL-Shimy M, and Abdelraheem M A, 2015). From the point of view of the lifetime of solar-PV modules, it is shown in (EL-Shimy M, and Abdo T, 2014) that the lifetime is highly dependent of the technological characteristics of the solar-PV materials. For example, the average lifetime of Mono-Si modules is 41 years while it is 30 years for Poly-Si modules. The average lifetimes of the major second generation modules are 19 years, 37 years, and 18 years for a-Si, CdTe, and CIS modules respectively.

There are two markets that can harness solar energy for electricity generation: the grid-connected or off-grid (autonomous isolated) systems. These two markets are described in the following subsections.

4.1. Grid-connected systems

The grid-connected systems are mainly utilized in urban or rural areas, which are interconnected to the National Electricity System (SEN). These systems consist of the following components (Fig. 4): (1) PV panel or array; (2) Inverter; (3) Other interconnecting devices that include protection, measurement, switches, protection, and bidirectional meter.

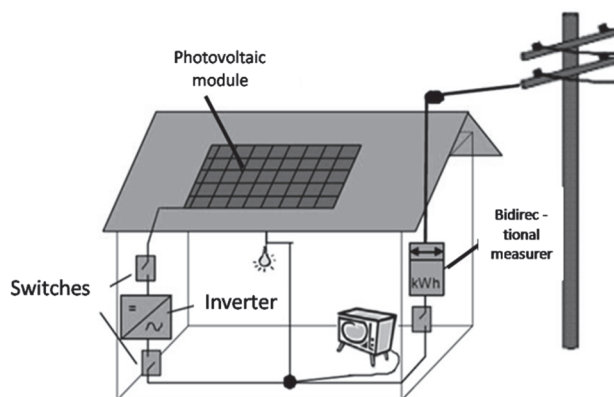


Figure 4. Example of grid-connected solar-PV system. (CONUEE/ GTZ, 2009 Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ))

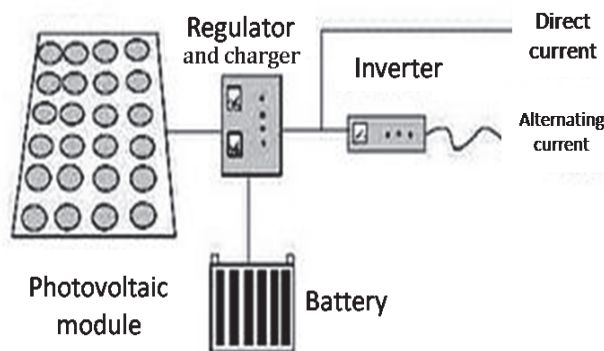


Figure 5. Off-grid solar-PV system

4.2. Isolated or off-grid systems

Isolated or off-grid systems can be found in rural or isolated areas, where it is not economically feasible to construct a grid interconnection with SEN. These systems consist of the following components (Fig. 5): (1) PV panel or array; (2) Battery bank and battery charger; (3) Interconnecting and protecting devices; (4) Inverter which required for supplying AC loads and can be excluded if the loads are DC.

Unlike conventional energy sources, some renewable energy sources are characterized by high variability and intermittency (EL-Shimy M, May 2015; EL-Shimy M, Nov. 2015). Consequently, electrical energy storage is essentially required in isolated systems that supply off-grid non-deferrable loads for providing the required instantaneous power balance. There are a variety of energy storage options (EL-Shimy M, Nov. 2015). The use of batteries is common in small-scale systems while R&D efforts are currently focused on finding techno-economically energy storage for large-scale and bulk energy applications. Probably, the hydrogen-based energy storage systems as well as the pumped hydro storage system show competitive viable bulk energy storage in the future. On the other hand, there is a class of loads that are deferrable such as irrigation water pumping systems (EL-shimy M, 2013). These loads do not require a precise instantaneous energy balance. Therefore, electrical energy storage is not required for these kinds of loads. Sometimes hydraulic energy storage is used in solar-PV supplied irrigation water pumping systems for energy security purposes rather than power balance requirements. As shown in Fig. 5, isolated systems are not usually equipped with energy measuring devices.

5. INDUSTRY OF SOLAR ENERGY IN MEXICO

Mexico is among the most attractive five countries worldwide for solar-PV projects; however, Mexico is still behind China and Singapore, because they are part of the Sun Belt region. The Sun Belt countries are located within latitudes + -35 with respect to the Equator and they exhibit higher levels of solar and sunlight radiation in comparison with the rest of the planet; however, there are areas where the solar irradiance is greater than 5kWh per m² in Mexico (Fig. 6). Market attraction also includes other factors such as market potential, politics, business environment, financial stability and renewable energy policies. The size of the electricity market, its projected growth in electricity consumption in the next two decades and the competitive cost of PV technology also coverage electricity networks and the ease of power distribution are among the others the market attractiveness reasons.

Currently, Mexico has an installed capacity of 33 MWp of solar-PV systems. The main applications are rural and industrial electrification. In addition, there are several construction and development projects of this kind that would have an installed capacity of 39.1 MWp. In late 2011, a Spanish company called Siliken invested in a photovoltaic power project in Durango called La Manzanadel Sol. The project has 100MWp of installed capacity and it is now in

its first stage and it is estimated that would be increased to a total of 400MWp in the five years after its initiation (Fig. 7).

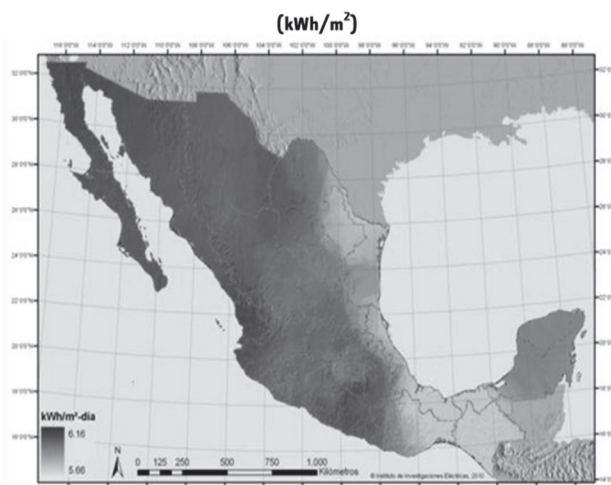


Figure 6. Annual average global solar radiation over Mexico (IIE)

Photovoltaic solar plants for electricity generation				
Central	Current status	Installation capacity (MW)	Location	Type of service
Contracts of small and medium scale	In preparation	32.0	-	Private
Central Piloto, Santa Rosalia	In preparation	1.0	Baja California South	Public
Total	-	33.0	-	-
Photovoltaic project, Durango	To start with operations	0.5	Durango	Private
Photovoltaic project (self-supply)	In construction	3.8	Aguscalientes	Private
Photovoltaic projects (small plant)	In construction	29.8	Jalisco	Private
Central Piloto, Cerro Prieto	In construction	5.0	Baja California	Public
Total		72.1		

Figure 7. PV centrals in México (CFE)

6. MARKET STRUCTURE

6.1. Major PV companies in Mexico

Mexico is the leading supplier of photovoltaic modules in Latin America, with an annual production capacity exceeding 276 MWp still above countries such as Chile, Brazil and Argentina. Among the leading developers of photovoltaic are: Abengoa, Abener, Del Sol Systems, Microm, Iberdrola and Silken.

In Mexico there are plans for operating power plants using the solar-thermal high-concentration; however, in the state of Sonora is developing the project 171 CC Agua Prieta II, by CFE that consists of a combined cycle hybrid system: 477 MWe, and a thermal solar field of trough parabolic channels with a power of 14 MWe. It is expected that this plant enter into operations soon (Fig. 8). The growth power generation and the energy mix for years 2000 to 2013 are illustrated in Fig. 9.

Potential growth of solar thermal energy in Mexico		
Region	Stage	Potential (MW)
North	Low	0
	Medium	816
	High	1,413
Northwest	Low	417
	Medium	837
	High	1,431
Total	Low	471
	Medium	1,653
	High	2,844

Source: IIE.

Figure 8. Growth potential of solar thermal energy in Mexico (IIE)

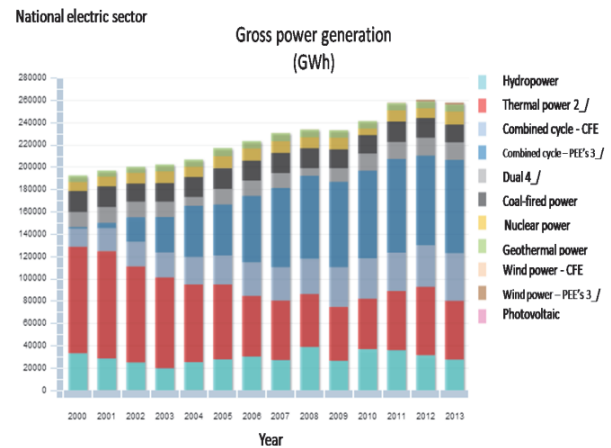


Figure 9. Gross Power Generation (SENER)

Table 1. Companies by number of employees

Strata	Economic units	Total Gross production	Intermediate consumption	Total expenses by consumption of B and S	Total investment	Gross census aggregate value	Total remunerations	Total revenues
Total	65	450968876	233857943	298861814	29504562	217110933	35520658	522313705
From 0 to 2	5	10284205	8485161	8486788	-32356	1799044	300	10451433
3-5	1	2100	1157	1186	0	943	0	2100
6-10	1	92538	79036	79036	0	13502	1021	92538
11-15	3	620686	620686	494161	20	4119	0	97966
16-20	3	99667	95548	94112	20	0	0	0
21-30	2	2859872	2132179	2132179	47609	727693	0	2580730
31-50	12	33293082	24408760	24409601	-127987	8884322	53907	30346885
51-100	1	243083	220004	233195	0	23079	0	243083
101-250	1	536132	231202	311708	1417	304930	49448	430398
251-500	2	20050472	11308700	12706982	119680	8741772	100219	1561760
501-1000	7	35295345	15597663	18240301	1771641	19697682	1691959	24897558
1001 and more	27	347591694	170804372	231672565	27593151	176787322	33623804	451020425
Total	65	450968876	233857943	298861814	29504562	217110933	35520658	522313705

Table 2. Concentration indexes

Strata	Economic units	Participation/Market share	%	P ² (HHI)	HH	ID(HH ²)
Total	65	1				
From 0 to 2	5	0.022804689	2.2804689	0.000520054	0.000855074	7.31E-07
From 3 to 5	1	4.66E-06	0.0004657	2.17E-11	0.608197431	0.369904115
6-10	1	0.000205198	0.0205198	4.21E-08	6.92E-08	4.79E-15
11-15	3	0.001376339	0.1376339	1.89E-06	3.11E-06	9.70E-12
16-20	3	0.000221006	0.0221006	4.88E-08	8.03E-08	6.45E-15
21-30	2	0.006341617	0.6341617	4.02E-05	6.61E-05	4.37E-09
31-50	12	0.073825676	7.3825676	0.00545023	0.008961285	8.03E-05
51-100	1	0.000539024	0.0539024	2.91E-07	4.78E-07	2.28E-13
101-250	1	0.001188845	0.1188845	1.41E-06	2.32E-06	5.40E-12
251-500	2	0.044460878	4.4460878	0.00197677	0.00325021	1.06E-05
501-1000	7	0.07826559	7.826559	0.006125503	0.010071569	0.000101437
1000-and more	27	0.770766482	77.076648	0.59408097	0.976789672	0.954118064
Total	65	1	100	0.608197431	1.608197431	1.32421522

6.2. Share of renewable energy companies

Table 1 shows the number of companies participating in the market for year 2009. It can be depicted that for this year there are 65 companies involved in this market segment. Gross production for year 2009 amounted to a total

of 450,968,876 units, with a total investment of 29,504,562 bp generated a total income of 522 313 705 million. The given figure shows that there are 27 companies that dominate this market with 77.07% of it.

6.3. Concentration index segment

Table 2 shows the participation of companies in the renewable energies sector in 2009. In addition, there are evaluations of the *Herfindal-Hirshman Concentration Index* (HHI) which were also calculated by size of enterprise. The data give an HHI of 0.60 that is a monopolistic competition because 27 of the 65 companies control the market hogging the 77.07% of the market and leaving only one 22.93% for all other companies.

Nonetheless, the economic theory tells that the market tends to be from monopolistic to oligopoly due to the size of companies and the influence they have in the market competition (**Table 2**).

The considered market is relatively new and little taken into account is a tempting niche for the large firms because consumers are almost all the same, houses, apartment buildings, hospitals, businesses, hotels, sport clubs, government projects, solar parks and even the producers themselves would benefit because costs would be lowering. It is known that the solar energy market in Mexico ascends amount millions of dollars, of which 30 belong to photovoltaic. Since it is an emerging market that is relatively new, it is extremely profitable for all companies making the development and growth of this focus solely on their production costs, and market strategy.

7. COSTS

Based on a recent data of the average costs of solar-PV systems (Said M, EL-Shimy M, and Abdelraheem M A, 2015), **Table 3** summarizes the investment as well as the O&M costs for grid-connected and standalone solar-PV generating systems. The table also shows the costs of DC and AC systems.

The costs of grid-connected solar-PV systems in Mexico are dependent on their capacities. In late 2011, SENER and GTZ conducted a survey to stakeholders and actors in the country to determine these costs. For the residential sector where the average investment for PV systems with a capacity between 0.24 kWp to 1.65 kWp is U.S.\$ 4,851/kWp with levelized costs of U.S.¢17.8/kWh. Meanwhile, the costs for systems with capacities between 2kWp to 10kWp are reduced to U.S. \$3,000 /kWp - 4,200/ kWp and levelized generation costs range from U.S.¢10.9/kWh (Mx\$1.3) to U.S. ¢15.4/kWh (Mx\$1.8). By early 2014 these costs were reduced to 1100 U.S. \$. In comparison with the average international costs of solar-PV systems (**Table 3**), it is clear that the costs offered in Mexico are smaller with a decreasing trend. It is estimated that the average life span of photovoltaic panels is 25years useful to 100% and up to 35years total lifetime. In addition, it is estimated that the initial investment is recovered in the medium term between 3 and 6 years after purchase.

8. REGULATORY FRAMEWORKS FOR RENEWABLE ENERGY

Currently, the following legal and regulatory instruments allow the use of solar-PV grid connection.

Table 3. Costs of solar-PV systems

DC No Sun Tracking		
Grid-connected	4,630	US\$/kWp
Standalone	4,030	US\$/kWp
O&M	30	US\$/KW-year
Inv replacement	0	US\$/W-10year
AC No Sun Tracking		
Fixed grid-connected	4,824	US\$/kWp
Fixed standalone	4,524	US\$/kWp
O&M	40	US\$/KW-year
Inv replacement	0.194	US\$/W-10year
AC Single axis tracking		
Fixed grid-connected	5,204	US\$/kWp
Fixed standalone	4,904	US\$/kWp
O&M	55	US\$/KW-year
Inv. replacement	0.194	US\$/W-10year
AC Two axis tracking		
Fixed grid-connected	5,784	US\$/kWp
Fixed standalone	5,484	US\$/kWp
O&M	55	US\$/KW-year
Inv. replacement	0.194	US\$/W-10year

8.1. General Law on Climate Change

On June 6, 2012, this law was published in the Official Gazette Diario Oficial de la Federación, which has among its purpose to ensure the right to a healthy environment and to establish the occurrence of powers of the three branches of government in the development and implementation of public policy on two guiding themes: Climate change adaptation and mitigation of emissions and greenhouse compounds.

8.2. Law on the Use of Renewable Energies, Financing of Energy Transition (LAERFTE), and its regulations

In late 2008, this law was published in the Official Gazette Diario Oficial de la Federación, which has the purpose to regulate the use of renewable energy for electricity generation for purposes other than the provision of public service. Its regulation was published in the Official Gazette of September 2, 2009, including more specific areas for compensation of renewable energy projects.

8.3. Interconnection Agreement for Renewable Energy and Power Cogeneration System in Small and Medium Scale

On April 8, 2010, the Energy Regulatory Commission (CRE) published these model contracts in the Official Gazette, and is intended to establish the rights and obligations of a user that connects a source of renewable energy to the

SEN. These interconnection agreements are based on the principle of "net metering".

8.4. Interconnection Agreement for Renewable Energy of Collective Source or Collective System in Small Scale Cogeneration contract (to be published by the CRE)

This type of contract applies to everything related to Small Scale generation described in the previous paragraph. With the characteristic that the collective source of electricity generation belongs to a group of generators, besides, the energy generated by the collective source. It is divided, for billing purposes, between the owners depending on the percentage of investment made by each of the owners.

Since PV systems can reduce or stop suddenly generate electricity, for example, partially cloudy days, it is also necessary to establish a series of technical rules to avoid discomfort or harm to other users. For this, the CRE and CFE have developed a specific regulatory framework for interconnection technologies based on renewable sources such as photovoltaic systems:

- 1) Specification for low voltage interconnection of photovoltaic systems with capacity up to 30 kW (CFE G0100-04).
- 2) Annexes to the Interconnection Agreement in Medium Scale: Characteristics of measuring equipment and communication (Annex E-RMT) and technical requirements for interconnection (Annex ERD-T).
- 3) General Rules for Interconnection to SEN or permit generators with renewable energy or efficient cogeneration (published in the Official Gazette by the CRE, the May 22, 2012).

In a graphical form, **Fig. 10** shows how the composed the regulatory and policy framework for PV in Mexico which consists of the following legal structure. In addition to public institutions (CRE and CFE) there are private institutions for issuing standards in the electricity sector such as the National Association for Standardization and Certification of the electricity sector that have issued Mexican Standards.

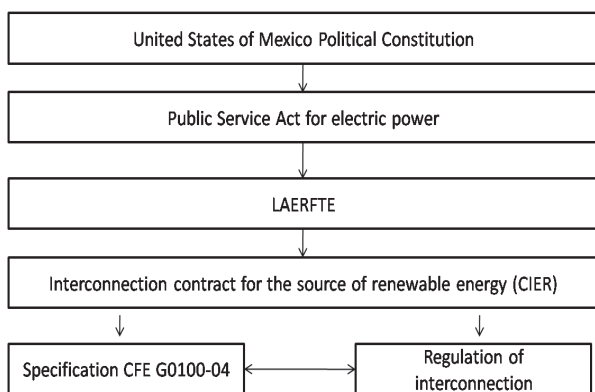


Figure 10. Legal structure (PROSOLAR SENER)

9. CONCLUSIONS

In the presented work, the growing behavior of the renewable energy market in Mexico is observed. The potential of the emerging market is identified. The main focus is placed on the solar-PV energy sector. Mexico is considered one of the most attractive countries to invest in this sector being considered as the 5th country with more possibility of development. Also it is seen that the HHI for 2009 is 0.60 which tells that it is a monopolistic competition with a tendency to be oligopoly. The profitability of the sector is abundant; generating profits of more than double the investment for businesses.

It is shown that the investment for consumers becomes profitable from the 3rd or 6th year, with investment costs below the international average values. Within the regulatory framework also there is a growing legislative restructure that encourage the development in different ways for both the private and the public sectors.

10. REFERENCES

- CRE ComisiónRegulatoria de Energía(2012) www.cre.gob.mx/documento/1770.pdf
- CONUEE/ GTZ, (2009) Deutsche GesellschaftfürInternationaleZusammenarbeit (GIZ).www.giz.de.
- Ruiz Jaimes, E. (2014). Energíasrenovables, el rumbo para México.El Economista (Nota periodística) <http://eleconomista.com.mx/entrenimiento/2014/03/12/energias-renovables-rumbo-mexico>
- INEGI CENSOS 2009 (México 2014) <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2009/default.asp?s=est&c=14220>
- LGCC, DOF, (2012) <http://tinyurl.com/LGCC-DOF>
- LAERFTE, DOF, (2008) <http://tinyurl.com/947pccg>
- PENG (2012).NegociosGlobales, Querétaro, México segundaedición CENEAGE
- PROSOLAR SENER (México, 2012) Programa de fomento de sistemasfotovoltaicos en Méxicowww.energia.gob.mx
- RLAERFTE, DOF, (2 de Septiembre de 2009) <http://tinyurl.com/947pccg>
- SENER Secretaria de energía (2014) <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html>
- Sáenz, G. (2007).La Regulación, Clave Para El Desarrollo De Las EnergíasRenovables.SENER (2014).Universidad Autónoma De Madrid, <http://www.renovables.gob.mx/>
- Secretaria De Economía (Mayo, 2013).ProMexico Inversion y Comercio; Energíasrenovables, Unidad de inteligencia de negocios http://mim.promexico.gob.mx/work/sites/mim/resources/Local-Content/42/2/130726_DS_Energias_Renovables_ES.pdf
- Secretaria De Economía (2014).ProMexicoInversión y Comercio http://mim.promexico.gob.mx/wb/mim/energias_perfil_del_sector
- Secretaria de energía (México, 2013).Prospectivadel Sector Eléctrico 2013-2027 http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/Prospectiva_del_Sector_Electrico_2013-2027.pdf
- SENER Secretaria de energía (México, 2013). Prospectivadel Sector Eléctrico 2013-2027 www.energia.gob.mx
- SENER (México, 2009).EnergíasRenovables para el DesarrolloSustentable en México. http://www.energia.gob.mx/res/0/ER_para_Desarrollo_Sustentable_Mx_2009.pdf

SENER (México, 2012). Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. www.energia.gob.mx

Secretaría de Energía (México, 2013). Prospectiva del Sector Eléctrico 2012-2026 Tercera Edición. Ed. Fondo de Cultura Económica. México.

http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PSE_2012_2026.pdf

EL-Shimy M, and Abdo T, (2014). PV Technologies: History, Technological Advances, and Characterization. In Sohail Anwar (ed.) Encyclopedia of Energy Engineering and Technology – Volume III, Taylor & Francis - CRC Press, 2014.

EL-Shimy M (Nov. 2015). Dynamic Security of Interconnected Electric Power Systems - Volume 2: Dynamics and stability of conventional and renewable energy systems. Lap Lambert Academic Publishing / Omniscriptum GmbH & Company Kg; Germany; 978-3-659-80714-5.

Said M, EL-Shimy M, and Abdelraheem MA, (2015). Photovoltaics energy: Improved modeling and analysis of the levelized cost of energy (LCOE) and grid parity–Egypt case study. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 9, pp.37-48.

EL-Shimy M, (May 2015). Dynamic Security of Interconnected Electric Power Systems - Volume 1. Lap Lambert Academic Publishing / Omniscriptum GmbH & Company Kg; Germany; 978-3-659-71372-9.

EL-Shimy M, (2013). Sizing optimization of standalone photovoltaic (PV) generators for irrigation water pumping Systems. International Journal of Sustainable Energy (IJSE), 2012. Available online: July 3, 2012. Volume 32, Issue 5, pp. 333 – 350.

RECIKLIRANJE OTPADNE GUME

WASTE RUBBER RECYCLING

Anita Ptiček Siročić ^{1*}, Dario Lonjak ¹, Franjo Florijanić ²

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

² Gumimpex-GRP d.d., Ul. Mihovila Pavleka Miškine 64, 42000, Varaždin, Hrvatska

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

Sažetak: Uzorci polimernih mješavina prirodne (NR) / stiren butadien (SBR) gume te gumenog granulata pripremljeni su prešanjem u laboratorijskoj preši. Određivanje reoloških svojstava uzoraka provedeno je na reometru i munimetru. Također, uzorcima su ispitana i mehanička svojstva odnosno prekidna čvrstoća, prekidno istezanje, daljnje zarezivanje, tvrdoća te odbojna elastičnost. Rezultati su pokazali da dodatak punila (gumeni granulati) ima utjecaj na mehanička i reološka svojstva svih uzoraka. Uzorci pripremljeni s većim udjelom gumenog granulata pokazuju smanjenje vrijednosti reoloških i mehaničkih svojstava u odnosu na uzorak bez gumenog granulata.

Cljučne riječi: polimerne mješavine, elastomeri, gumeni granulati, mehanička svojstva, reološka svojstva

Abstract: Samples of polymer blends (NR/SBR/rubber granulate) are prepared by compressing in a laboratory press. Determining the rheological properties of the samples was performed on a rheometer and munimetre. NR/SBR/rubber granulate blends are characterized by determination of mechanical properties (tensile strength, elongation, further scoring, hardness and repulsive elasticity). Results showed that addition of the filler (the rubber granules) has an effect on the mechanical and rheological properties of all the samples. The samples prepared with a higher amount of added rubber granules show a reduction of rheological and mechanical properties in comparison to the sample prepared without rubber granulates.

Keywords: polymer blends, elastomers, rubber granulate, mechanical properties, rheological properties

Received: 20.10.2016 / Accepted: 25.11.2016

Published online: 14.12.2016

Pregledni rad / Review paper

1. UVOD

U posljednjih pola stoljeća, polimeri i polimerni materijali zauzeli su nezamjenjivo mjesto u industriji i društvu zahvaljujući velikoj raznolikosti svojstava poput čvrstoće, trajnosti, prilagodljivosti te povoljnom odnosu cijena – svojstvo te su pronašli primjenu u gotovo svim segmentima ljudskog života.

Guma je najpoznatiji polimerni materijal iz skupine elastomera dobiven vulkanizacijom kaučuka te je izuzetno mehanički čvrsta i žilava. Osim svojstva elastičnosti, gume posjeduju i druga povoljna svojstva npr. neki gumeni materijali nepropusni su na vodu i zrak, postojani na visokim i niskim temperaturama itd. Osnovna sirovina za proizvodnju gume prirodni je ili sintetski kaučuk, koji zbog svojih nepovezanih lančastih makromolekula procesom zagrijavanja postaje ljepljiv i mekan, a na nižim temperaturama lomljiv i tvrd. Međutim, procesom vulkanizacije makromolekularni lanci međusobno se povezuju te se dobiva guma, materijal najšire tehničke primjene. Od gume se izrađuje na tisuće različitih artikala poput obuće, brtve, cijevi, zračnica, zaštitnih podloga itd.

Danas se guma koristi u gotovo svim granama industrije od poljoprivrede, zrakoplovstva, medicine itd. Proizvodnja guma, ali i njihova potrošnja stvara velike količine gumenog otpada koji iz godine u godinu raste čime se stvara veliki pritisak na okoliš. Stoga je, sukladno Direktivi 1999/31/EC (Council Directive, 1999) svako odlaganje otpadnih guma u okoliš potpuno zabranjeno pa je količina otpadnih guma znatno porasla. Također,

Direktivom 2008/98/EC (Directive 2008/98/EC, 2008) propisana je hijerarhija gospodarenja otpadom prema kojoj je najpoželjnija prevencija, zatim slijedi priprema za ponovnu uporabu, recikliranje, druge potrebe (materijalne i energetske svrhe) te zbrinjavanje.

Kod gospodarenja otpadnim gumama u Republici Hrvatskoj najviše pažnje pridaje se recikliranju otpadne gume te upotrebi recikliranog materijala za proizvodnju novog proizvoda. Cilj ovog rada bio je istražiti utjecaj recikliranog gumenog granulata na mehanička i reološka svojstva polimerne mješavine NR (prirodne gume)/stiren butadien gume (SBR).

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. Priprava uzoraka

Uzorci polimernih mješavina (NR/SBR/gumeni granulati) pripremljeni su na hidrauličkoj laboratorijskoj preši „Moore“ pri temperaturi od 160 °C, tlaku od 20 bara te u trajanju od 10 min. Gumeni granulati dobiveni je mljevenjem otpadnih teretnih guma te očišćen od metala i tekstila. Prije prešanja, guma je promiješana u laboratorijskom mikseru te je dodatno homogenizirana na laboratorijskom dvovaljku. Sastav uzoraka prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Sastav uzoraka

Uzorak	NR/SBR (%)	Gumeni granulat (%)	Ulje Gumanol 460 (%)
U ₁ (NR/SBR + 0 GG)	100	0,0	0,0
U ₂ (NR/SBR + 15 GG)	86,2	12,9	0,9
U ₃ (NR/SBR + 25 GG)	79,4	19,8	0,8
U ₄ (NR/SBR + 35 GG)	73,5	25,7	0,7
U ₅ (NR/SBR + 45 GG)	68,5	30,8	0,7

2.2. Metode karakterizacije

2.2.1. Reološka svojstva

Pripremljenim uzorcima ispitana su reološka svojstva na reometru i munimetru. Reometar se sastoji od dva kalupa, fiksnog gornjeg dijela plate (160 °C) i donjeg dijela (160 °C) koji se zakreću za 0,5 °. Uzorak je 6 minuta izložen oscilirajućem smičnom naprezanju te su izmjereni minimalni i maksimalni otpor zakretanju, vrijeme potrebno da se dosegne 50 % (t'50) ili 90 % (t'90) vulkanizacije. Ispitivanje otpora tečenju uzoraka provedeno je na munimetru tijekom 5 minuta pri T=100 °C.

2.2.2. Mehanička svojstva

Ispitivanje mehaničkih svojstava ispitnih epruveta provedeno je na kidalici TensorCheck Profile. Ispitivanjem je određeno daljnje zarezivanje (N/mm), prekidna čvrstoća (N/mm²) i prekidno istezanje (%). Postupak ispitivanja tvrdoće uzorka zasniva se na mjerenju otpora kojeg pruža materijal prilikom utiskivanja igle mjernog uređaja u uzorak. Skala tvrdoće je od 0 za materijale male tvrdoće, kada se probojac u cijelosti utisne u uzorak, do 100, kada je dubina utiskivanja 0 ili nema nikakvog utiskivanja. Ispitivanje odbojne elastičnosti provedeno je na uređaju za mjerenje odbojne elastičnosti, a omogućava utvrđivanje elastičnosti elastomera s tvrdoćom od 30 – 85 točaka po IRHD, International Rubber Hardness Degrees (ISO 48, 1994; ASTM 1415-88, 1994). Normalizirana elastičnost predstavlja odnos između povratne energije i primijenjene energije u sudaru čekića uređaja i uzorka.

Mjerenje je izvedeno s obzirom na kut odboja čekića nakon udara. Uređaj automatski izračunava srednje i standardno odstupanje u 5 testova. Ispitivanjem habanja

(istrošenosti) uzoraka dobivena je procjena otpornosti na abraziju uzoraka. Abrazija standardnog uzorka dobivena je pomoću standardiziranog brusnog papira na rotirajućem valjku u određenom vremenskom razdoblju kada uzorak "prijeđe" duljinu od 40 m.

3. REZULTATI I RASPRAVA

3.1. Reološka svojstva

Ispitivanjem reoloških svojstava uzoraka u koje je kao punilo dodan različiti udio recikliranog gumenog materijala u obliku mljevenog gumenog granulata, prikazuje značajan utjecaj granulata na promjenu reoloških svojstava. Uzorcima su ispitani minimalni i maksimalni otpor zakretanju na reometru s ciljem utvrđivanja postotka umrežavanja kaučukovih smjesa, a rezultati su prikazani u **tablicama 2 i 3**.

Iz **tablice 2** vidljivo je povećanje minimalnog otpora zakretanja uzoraka s povećanjem udjela dodanog gumenog granulata. Vrijednosti maksimalnog otpora zakretanju smanjuju se proporcionalno od uzorka U₁ (NR/SBR + 0 GG), pripremljenim bez gumenog granulata (14,81 dN m) do uzorka U₅ (NR/SBR + 45 GG) (11,68 dN m). Razlog tome je nemogućnost molekulskog umrežavanja prilikom vulkanizacije sirove gume sa gumenim granulatom jer je gumeni granulati već prethodno vulkaniziran. Podjednake vrijednosti brzine vulkanizacije svih uzoraka (Ts 1, Ts 2, t'50, t'90) upućuju na zaključak da dodatak gumenog granulata nema značajnijeg utjecaja na brzinu vulkanizacije, što je i logično s obzirom da gumeni granulati kao prethodno vulkaniziran materijal nema mogućnost interakcije sa ubrzivačima, umreživačima te aktivatorima koji direktno utječu na brzinu vulkanizacije NR/SBR gume (Ismail et al. 2001; Noriman et al. 2008).

Tablica 2. Rezultati ispitivanja otpora zakretanja

Uzorak	Otpor zakretanja (min) (dNm)	Otpor zakretanja (max) (dNm)	Ts 1 (min)	Ts 2 (min)	t'50 (min)	t'90 (min)
U ₁ (NR/SBR + 0 GG)	1,71	14,81	1,14	1,36	2,07	3,93
U ₂ (NR/SBR + 15 GG)	2,28	13,74	1,02	1,21	1,82	3,65
U ₃ (NR/SBR + 25 GG)	2,75	12,99	1,05	1,26	1,88	3,75
U ₄ (NR/SBR + 35 GG)	3,09	12,45	1,01	1,25	1,87	3,80
U ₅ (NR/SBR + 45 GG)	3,44	11,68	1,06	1,33	1,93	3,92

Ts 1/Ts 2 – vrijeme potrebno da otpor poraste za 1 MU, odnosno 2 MU (Mooney units)
t'50/ t'90 – vrijeme potrebno da se postigne 50 %, odnosno 90 % vulkanizacije

Tablica 3. Rezultati ispitivanja otpora zakretanja

Uzorak	Početni otpor zakretanja (MU)	Minimalni otpor zakretanja (MU)	Otpor zakretanja nakon 4 min (MU)
U ₁ (NR/SBR + 0 GG)	36,02	23,50	23,50
U ₂ (NR/SBR + 15 GG)	33,91	29,99	29,99
U ₃ (NR/SBR + 25 GG)	43,74	36,12	36,12
U ₄ (NR/SBR + 35 GG)	58,73	41,06	41,04
U ₅ (NR/SBR + 45 GG)	55,36	44,88	44,88

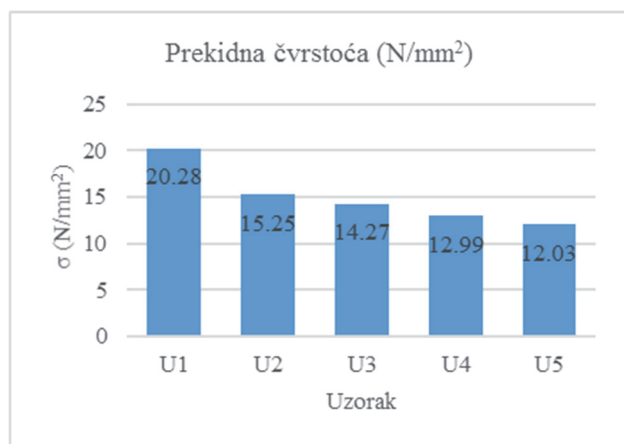
Tablica 4. Rezultati ispitivanja tvrdoće, odbojne elastičnosti i volumena habanja

Uzorak	Tvrdoća (ShA)	Odbojna elastičnost (%)	Volumen habanja (mm ³)
U ₁ (NR/SBR + 0 GG)	63	49,55	84,27
U ₂ (NR/SBR + 15 GG)	62	45,19	69,97
U ₃ (NR/SBR + 25 GG)	62	42,11	77,31
U ₄ (NR/SBR + 35 GG)	62	44,90	77,74
U ₅ (NR/SBR + 45 GG)	61	42,52	83,64

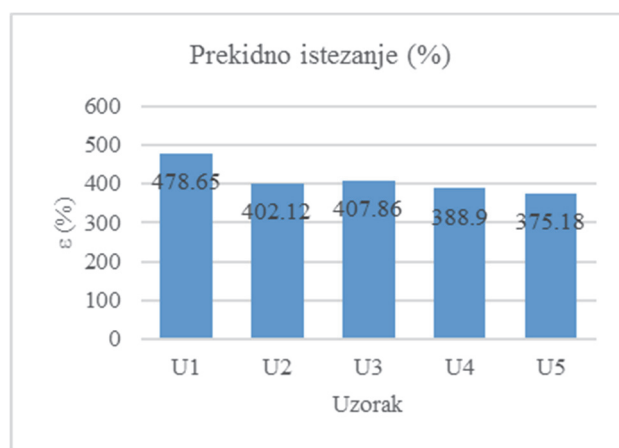
Iz rezultata ispitivanja otporu zakretanja (tablica 3), koji se izražava u Mooney-evim jedinicama (MU) vidljivo je rasipanje dobivenih vrijednosti s obzirom na početni otpor zakretanja. Uzorku U₁ (NR/SBR + 0 GG) početni otpor zakretanja iznosi 36,02 MU, uzorku U₂ (NR/SBR + 15 GG) 33,91 MU dok preostalim uzorcima vrijednosti početnog otpora zakretanja rastu. Za pretpostaviti je da izostanak dodatka procesnog ulja u uzorku U₁ utječe na dobiveni rezultat. Također, prema minimalnom otporu zakretanja može se zaključiti da uzorci kojima je dodano punilo u većem udjelu imaju veći otpor zakretanja u odnosu na početni uzorak odnosno na uzorak u kojem nema gumenog granulata (Ahmad et al. 2015).

3.2. Mehanička svojstva

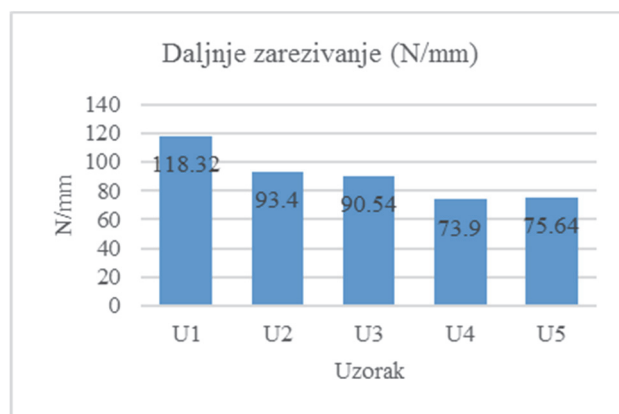
Mehanička svojstva polimernih materijala karakteristični su parametri koji opisuju ponašanje materijala pod djelovanjem mehaničke sile kao i slabljenje materijala u uvjetima uporabe. Nadalje, mehanička svojstva polimera, koji sadrži različite dodatke, ovisit će uz ostalo i o vrsti dodanih punila, kompatibilnosti punila s polimerom, veličini i raspodjeli čestica aditiva i dr. Pripremljenim uzorcima ispitana su mehanička svojstva odnosno prekidna čvrstoća, prekidno istezanje i daljnje zarezivanje, a rezultati su prikazani na slikama 1-3.



Slika 1. Prekidna čvrstoća



Slika 2. Prekidno istezanje



Slika 3. Daljnje zarezivanje

Ispitivanjem mehaničkih svojstava na kidalici (istezanje, čvrstoća, otpornost na daljnje zarezivanje) vidljivo je da dodatak zrnatog punila kao gumenog granulata (veličina čestica od 0,01 pa do 0,04 mm) ima znatan utjecaj na smanjenje mehaničkih svojstava. Općenito, može se zaključiti da su mehanička svojstva pripremljenih uzoraka U₂ (NR/SBR + 15 GG), U₃ (NR/SBR + 25 GG), U₄ (NR/SBR + 35 GG), U₅ (NR/SBR + 45 GG) narušena u odnosu na čisti uzorak U₁ (NR/SBR

+ 15 GG). Iz dobivenih vrijednosti prekidne čvrstoće, prekidnog istezanja i daljnjeg zarezivanja kod svih uzoraka za pretpostaviti je da se dodatkom većih koncentracija punila (gumeni granulati) mehanička svojstva smanjuju. Tvrdoća je svojstvo materijala, odnosno gume koja se protivi zadiranju stranog tijela u svoju strukturu. Za mjerenje tvrdoće guma koristi se tvrdoća po Shoreu A. Rezultati ispitivanja tvrdoće, odbojne elastičnosti i habanja prikazani su u **tablici 4**.

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da između pripremljenih uzoraka u odnosu na početni uzorak postoje gotovo minimalna odstupanja. Međutim, dodatkom punila (gumeni granulati) ipak je vidljivo da se tvrdoća smanjuje s povećanjem udjela gumenog granulata u odnosu na početni uzorak (Rattanasom et al. 2009; Elen et al. 2012).

Odbojna elastičnost omogućava ispitivanje odnosa između povratne energije i primijenjene energije u sudaru čekića uređaja i uzorka. Procjena mjerenja izvodi se ovisno o kutu odboja čekića nakon udara. Ispitivanje se sastoji od pet mjerenja te se na temelju tih vrijednosti izračunava aritmetička sredina. Ispitivanjem odbojne elastičnosti vidljivo je smanjenje odbojne elastičnosti uzoraka U2 (NR/SBR + 15 GG), U3 (NR/SBR + 25 GG), U4 (NR/SBR + 35 GG), U5 (NR/SBR + 45 GG) u odnosu na početni uzorak U1 (NR/SBR + 15 GG) za 4 – 8 %.

Habanje, odnosno istrošenost uzorka daje uvid u procjenu otpornosti na habanje uzorka. Prije stavljanja uzorka na uređaj za ispitivanje habanja, izračunava se volumen standardnog uzorka. Nakon izračunatog početnog volumena, ispitni uzorak stavlja se na uređaj na kojem uzorak prelazi 40 m preko standardiziranog brusnog papira (Mohamed et al. 2011). Nakon toga, uzorku se mjeri volumen te se rezultat habanja prikazuje razlikom između početnog volumena i volumena nakon ispitivanja. Iz dobivenih rezultata habanja, vidljivo je da analiza napredovanja oštećenja po volumenu uzorka pokazuje da su svi uzorci s gumenim granulatom bolji od početnog uzorka U1 bez obzira na činjenicu da su vrijednosti prekidne čvrstoće, prekidnog istezanja i daljnjeg zarezivanja ispitivanih uzoraka znatno niže u odnosu na uzorak U1.

4. ZAKLJUČAK

Miješanje polimernih materijala uspješna je metoda pripreme novih polimernih materijala koji imaju poboljšana svojstva u odnosu na polazne komponente. Mehaničko miješanje jedna je od najstarijih metoda za pripremu polimernih mješavina, primjerice miješanjem prirodne gume (NR) i stiren-butadien (SBR) gume uz dodatak različitih vrsta punila moguće je produžiti životni vijek guma što je vrlo važno za razvoj i izradu novih materijala.

Ispitivanjem mehaničkih i reoloških svojstava pripremljenih polimernih mješavina, vidljivo je da dodatak gumenog granulata kao punila ne utječe znatnije na ispitivana svojstva jer dobivene vrijednosti još uvijek udovoljavaju potrebnim standardima kvalitete krajnjeg proizvoda. S obzirom da se određeni udio reciklirane otpadne gume koristi u proizvodnji novih gumenih proizvoda, potrebno je poznavati svojstva budućeg proizvoda odnosno potrebno je istražiti dozvoljeni udio

gumenog granulata u mješavini. Također, miješanje gumenog granulata, kao produkta recikliranja otpadnih guma, s kompatibilnim polimernim materijalima zasigurno će biti prihvaćen kao jedan od alternativnih načina rješavanja problema otpadnih guma s ciljem dobivanja novog proizvoda.

5. LITERATURA

Ahmad HS, Ismail H, Azura AR (2015), Comparison properties of natural rubber/virgin acrylonitrile-butadiene rubber and natural rubber/recycled acrylonitrile-butadiene rubber blends. *Iran Polym J* 28 185–195.

ASTM 1415-88 (1994), Test Method for Rubber Property – International Hardness

Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste

Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives

Elen BAV, Pacheco LL, Visconte Y, Furtado CRG, Neto JRA (2012), Recycling of rubber: Mechano-chemical Regeneration. In: Whyters MC (ed) *Advances in Materials Science Research*, Nova Science Publishers

Ismail H, Tan S, Poh BT (2001) Curing and mechanical properties of nitrile and natural rubber blends. *J Elastom Plast* 33:251–262

ISO 48: 1994, Physical Testing of Rubber, Methods for the Determination of Hardness

Liang H, Fukahori Y, Thomas AG, Busfield JJC (2010), The steady state abrasion of rubber: Why are the weakest rubber compounds so good in abrasion?. *Wear* 268 (5–6):756–762

Mohammed BS, Azmi NJ, Abdullahi M (2011), Evaluation of rubbercrete based of ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. *Constr Build Mater* 25:1388-1397.

Noriman NZ, Ismail H, Rashid A (2008) Curing characteristics, mechanical and morphological properties of styrene butadiene rubber/virgin acrylonitrile-butadiene rubber (SBR/vNBR) and styrene butadiene rubber/recycled acrylonitrile-butadiene rubber (SBR/rNBR) blends. *Polym Plast Technol Eng* 47:1016–1023.

Rattanasom N, Prasertsri S, Ruangritnumchai T (2009) Comparison of the mechanical properties at similar hardness level of natural rubber filled with various reinforcing-fillers. *Polym Test* 28:8–12.

ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

NUCLEAR WASTE DISPOSAL

Lucija Nad, Boris Kavur ^{1*}

¹ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

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

Sažetak: U radu se obrađuju problematika i mogućnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada (RAO). Prikazane su različite strategije odlaganja RAO, svjetska iskustva i praksa te neki geotehnički aspekti problematike odlaganja RAO. Daje se osvrt na problem izbora lokacije odlagališta i provedbu istražnih radova. Opisan je koncept dubokog geološkog odlagališta i primjena višestrukih barijera za izolaciju RAO. Navode se prikladni tipovi matičnih stijena za smještaj odlagališta uključujući geološke i hidrogeološke uvjete koje treba pružiti odabrana geološka formacija. Također se opisuju načini i nužni uvjeti za plitko odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada. Prikazuju se i mogućnosti za preliminarnu procjenu sigurnosti odlagališta RAO. Daje se osvrt na situaciju u Hrvatskoj u pogledu rješavanja aktualnog problema izbora lokacije budućeg skladišta i odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada.

Ključne riječi: odlaganje radioaktivnog otpada, izbor lokacije odlagališta, procjena sigurnosti odlagališta.

Abstract: The paper discusses issues and possibilities for nuclear waste (NW) disposal. Various strategies, international experience and practice in NW disposal as well as geotechnical aspects of the disposal are shown. It provides an overview on the problem of site selection for NW repository and implementation of exploratory works. The paper describes the concept of a deep geological repository and the application of multiple barriers for NW isolation. Suitable types of host rocks including geological and hydrogeological conditions in the selected geological formation are discussed. It also describes the methods and necessary conditions for shallow disposal of low and intermediate level NW. Possibilities for a preliminary assessment of the safety of NW repository are also discussed. It provides an overview of the situation in Croatia regarding the current problem of site selection for a future storage and disposal site of low and intermediate level nuclear waste.

Keywords: nuclear waste disposal, selection of disposal site, safety assessment of deep geological repository.

Received: 09.11.2016 / Accepted: 01.12.2016

Published online: 14.12.2016

Pregledni rad / Review paper

1. UVOD

Radioaktivni otpad (RAO) nastaje u različitim fazama nuklearnog ciklusa koji započinje eksploatacijom ruda urana i njihovim kemijskim oplemenjivanjem odnosno obogaćivanjem, proizvodnjom i reprocesiranjem nuklearnog goriva za pokretanje nuklearnih reaktora, proizvodnjom nuklearnog oružja, radom nuklearnih reaktora i trošenjem nuklearnog goriva, rastavljanjem odsluženih reaktora i oružja, u znanstvenim institutima koji se bave nuklearnim istraživanjima, primjenom izvora zračenja u medicini, industriji itd. Nuklearne elektrane su glavni proizvođači RAO-a. Treba reći da se strogo uzevši prema definiciji RAO-a u takav otpad ne svrstavaju prirodno radioaktivni materijali (npr. rudnička jalovina) kao ni istrošeno nuklearno gorivo (ING) iz nuklearnih reaktora.

Problematika odlaganja RAO u mnogome je slična problematici odlaganja opasnih, visoko toksičnih otpada, ali ima određene specifičnosti. Količine RAO-a su relativno male u odnosu prema količinama konvencionalnih otpada.

Glavni cilj odlaganja je sigurno uskladištiti i izolirati RAO od biosfere odnosno onemogućiti njegove štetne utjecaje na zdravlje čovjeka i okoliš. Zbog specifičnih svojstava koje RAO posjeduje, osobito visoko radioaktivni otpad (VRAO), njegovo odlaganje zahtjeva poseban pristup i odgovarajuća, visoko pouzdana

tehnička rješenja. Zbog velikog broja međudjelujućih procesa koji su uključeni u proces odlaganja RAO, sustavi odlaganja i zaštite su vrlo kompleksni, a mogućnosti za sanaciju okoliša u slučaju nuklearnih havarija su vrlo ograničene. Osim toga, potreban životni vijek dubokog geološkog odlagališta VRAO mjeri se desecima tisuća godina, a to znatno nadilazi zahtjeve klasičnih građevinskih i okolišnih projekata (Gens i Thomas 2006).

Cilj ovog rada je prikazati različite strategije odlaganja RAO, svjetska iskustva i praksu te neke geotehničke aspekte problematike odlaganja. U radu će se dati osvrt na problematiku određivanja lokacije odlagališta RAO i provedbu istražnih radova. Opisat će se koncept višestrukih barijera za izolaciju RAO i prikladni tipovi matičnih stijena za smještaj odlagališta te geološki i hidrogeološki uvjeti koji trebaju biti osigurani. Osim toga prikazat će se i mogućnosti za preliminarnu procjenu sigurnosti odlagališta RAO.

Na kraju rada daje se i osvrt na situaciju s RAO-om u Hrvatskoj i aktualni problem nepostojanja definitivne lokacije za skladištenje i odlaganje niskog i srednje radioaktivnog otpada.

2. PRIPREMA RAO ZA SKLADIŠTENJE I ODLAGANJE

RAO najvećim dijelom nastaje u nuklearnim elektranama i postrojenjima za proizvodnju i reprocesiranje nuklearnog goriva. Osim toga određene manje količine RAO nastaju i u istraživačkim institutima, industriji i medicini, te vojnoj industriji.

Grubu podjelu RAO u svrhu njegovog zbrinjavanja moguće je napraviti na temelju aktivnosti i udjela radionuklida u otpadu te njihovom vremenu poluraspada. RAO se tako najčešće svrstava u sljedeće razrede:

a) Nisko radioaktivni otpad, skrać. NRAO (eng. Low Level Waste, LLW) – sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada, male specifične aktivnosti i zanemarivim udjelom radionuklida s dugim vremenom poluraspada. Ovakav otpad obično se zbrinjava u površinskim ili plitkim podzemnim odlagalištima.

b) Srednje radioaktivni otpad, skrać. SRAO (eng. Medium or Intermediate Level Waste, MLW ili ILW) – može imati znatnu radioaktivnost i sadržavati kratkoživeće, ali i dugoživeće radionuklide. Ako sadrži zanemariv udio dugoživećih radionuklida zbrinjava se na isti način kao i NRAO. U protivnom bi se trebao odlagati u dubokim geološkim odlagalištima.

c) Visoko radioaktivni otpad, skrać. VRAO (eng. High Level Waste, HLW) – sadrži veliki udio dugoživećih radionuklida u obliku fizijskih produkata i transuranijskih elemenata koji se stvaraju u jezgri reaktora. Osim visoke razine radioaktivnosti VRAO proizvodi značajne količine topline te zahtijeva izolaciju i hlađenje što znatno komplicira njegovo odlaganje. VRAO treba biti konačno odložen u dubokim i stabilnim geološkim odlagalištima.

S obzirom na volumen ukupno nastalog RAO u svijetu, na NRAO otpada čak 90% proizvedenog otpada, SRAO oko 7% i VRAO svega 3% ukupnog volumena ili oko 10 tisuća t/god (Mc Combie i dr. 2000). Međutim, radioaktivnost VRAO čini 95% ukupne radioaktivnosti, a NRAO ima tek 1% radioaktivnosti. NRAO obično čine kontaminirani alati i radna odjeća, a SRAO metalni otpad iz postrojenja nuklearne elektrane, filtri od procesa pročišćavanja radioaktivne vode i dr.

Treba razlikovati skladištenje od odlaganja radioaktivnog otpada. Pod skladištenjem se podrazumijeva privremeno čuvanje RAO u prikladno izoliranom i nadziranom prostoru kroz kraće ili dulje vrijeme koje prethodi njegovom konačnom odlaganju. ING se tako prvo skladišti u bazenu s vodom, neposredno uz reaktor, a zatim u suhom skladištu koje se obično nalazi na prostoru nuklearne elektrane. Vrijeme skladištenja ING-a se planira na razdoblje od više desetaka godina. Tijekom skladištenja ING se hladi, a radioaktivnost mu znatno opada čime se olakšava njegovo konačno zbrinjavanje. Nakon 40 godina radioaktivnost ING-a opada na tisućinku početne vrijednosti (WNA 2016), ali radi se još uvijek o vrlo visokim razinama radioaktivnosti. Kratkoživeći radioaktivni otpad može se skladištiti dok mu aktivnost ne opadne toliko da se smije kontrolirano ispuštati u okoliš ili odlagati kao običan otpad. Odlaganje podrazumijeva trajno zbrinjavanje RAO pri kojem se RAO izolira od biosfere korištenjem niza inženjerskih barijera uključujući i geološku formaciju.

Prije samog skladištenja i odlaganja RAO se podvrgava prikladnim postupcima obrade i kondicioniranja. Predobrada uključuje sakupljanje i razvrstavanje otpada u skladu s mogućnostima naknadnog odlaganja, te dekontaminaciju i eventualno manju kemijsku promjenu. Obrada RAO uključuje različite postupke kao npr. kompaktiranje, spaljivanje, isparavanje, filtriranje i odvajanje, kojima je cilj promjena svojstava i sastava otpada radi smanjenja volumena i povećanja sigurnosti i ekonomičnosti skladištenja i odlaganja. Kondicioniranje RAO uključuje postupke imobiliziranja i pakiranja (slika 1).



Slika 1. Kontejner s metalnim dvjestolitarским bačvama za pakiranje RAO u odlagalištu Olkiluoto u Finskoj.



Slika 2. Metalni spremnici za istrošeno nuklearno gorivo u budućem odlagalištu VRAO i ING u Finskoj.

Imobilizacija tekućeg otpada podrazumijeva njegovu solidifikaciju (zalijevanje) u betonsku ili bitumensku matricu odnosno ako se radi o VRAO vitrifikaciju (ostakljivanje) u staklenu matricu. Imobilizirani RAO se zatim smješta u čelične bačve ili druge posebno konstruirane spremnike s debelim stjenkama. Na slici 1 prikazan je kontejner s čeličnim dvjestolitarским bačvama koje se koriste za pakiranje nisko i srednje radioaktivnog otpada u odlagalištu Olkiluoto u Finskoj.

Na **slici 2** prikazani su metalni spremnici za pakiranje istrošenog nuklearnog goriva koji će se koristiti u budućem dubokom geološkom odlagalištu za VRAO Onkalo u Finskoj. Na **slici 2** lijevo je prikazan čelični spremnik u koji se smješta 12 gorivnih elemenata, a desno na istoj slici prikazan je vanjski zaštitni spremnik od bakra koji obuhvaća čelični spremnik.

3. ODLAGANJE RAO

Odabir lokacije budućeg odlagališta RAO je dugotrajan i skup proces na koji utječu brojni čimbenici. U početnoj fazi potrage za lokacijom budućeg odlagališta nastoji se primjenom različitih isključivih kriterija, koji se prvenstveno odnose na geološke (litologija, tektonika, seizmika i dr.), hidrogeološke i hidrološke uvjete, eliminirati široka područja obzirom na postavljene kriterije. U sljedećoj fazi nastoji se rangirati potencijalne lokacije korištenjem različitih usporedbenih kriterija. Ako je na raspolaganju više potencijalnih lokacija, među kriterijima koji utječu na odabir, najvažniji bi trebao biti kriterij prirodne pogodnosti terena za lociranje odlagališta i izolaciju otpada radi sprječavanja širenja onečišćenja u okoliš.

Proces odabira lokacije bi trebala usmjeravati „struka“, ali on mora biti transparentan, javan i demokratski, tako da uključuje sve dionike procesa, od Vlade i političkih stranaka do šire javnosti i naravno lokalne zajednice. Od samog početka treba jasno postaviti ciljeve, tehničke i druge zahtjeve te kriterije, koji će se primjenjivati tijekom procesa odabira lokacije. Osim tehničkih čimbenika na konačan odabir lokacije odlagališta prevladavajući utjecaj ipak imaju politika i stav društvene zajednice.

Na odabranoj lokaciji/lokacijama budućeg odlagališta istražnim radovima treba utvrditi sve relevantne značajke matične stijene i ostatka geosfere. Program istražnih radova je potrebno smisljeno planirati, obično po fazama, te voditi, nadzirati i prilagođavati tijekom samih radova ovisno o rezultatima istraživanja.

Rezultati istraživanja bi trebali potvrditi značajke matične stijene kao i šire geosfere koje se od njih očekuju. Istražni radovi za lokaciju budućeg odlagališta RAO su slični rudarskim istraživanjima, ali ipak imaju bitne specifičnosti. Ovdje je glavni naglasak na detaljnoj geološkoj karakterizaciji strukture matične stijene i njene propusnosti. Mehanička svojstva stijene, iako značajna, ovdje ipak imaju manji prioritet. Istražni radovi obično uključuju bušenje dubokih bušotina s kontinuiranim jezgrovanjem nabušenih stijena te terenske pokuse vodopropusnosti. Istražnim programom treba favorizirati nerazorne tehnike ispitivanja tj. geofizičke metode (seizmika, geoelektrika, georadar i dr.) kako se ne bi otvarali novi, preferencijalni putevi za kasniju migraciju onečišćenja (Gens i Thomas 2006). Detaljna karakterizacija matične stijene bit će omogućena tek nakon izgradnje pristupnih okana i horizontalnih prostorija odlagališta. Istražni radovi su vrlo skupa investicija u koju se kreće s neizvjesnim ishodom. Primjera radi, Njemačka je počevši od 1979. investirala 1,5 milijardi Eura u istraživanja ležišta soli u Gorleben (WNA 2016) da bi se utvrdilo je li ta lokacija sigurna za buduće duboko

geološko odlagalište. Gorleben se još uvijek smatra samo potencijalnom lokacijom odlagališta VRAO (WNA 2016).

Dubina budućeg odlagališta s jedne strane ovisi o vrsti RAO i regulatornim zahtjevima za dugoročnu sigurnost, a s druge o specifičnim značajkama lokacije i projektiranog sustava za odlaganje. Razlikujemo tako površinska (na površini terena) i plitka odlagališta (dubine do nekoliko desetaka metara) te duboka geološka odlagališta u stabilnim, slabopropusnim formacijama koja se planiraju graditi na dubinama od nekoliko stotina metara od površine terena. Pojedine zemlje razmatraju odlaganje svih vrsta RAO, uključujući i NRAO, u duboka geološka odlagališta jer smatraju da će se veći troškovi odlaganja kompenzirati s povećanjem sigurnosti za ljude i okoliš (Gens i Thomas 2006).

U svijetu se danas razmatraju dvije mogućnosti dubokog geološkog odlaganja. Prva i vjerojatno realnija mogućnost je izrada kopanog ili rudarskog podzemnog odlagališta, a druga je odlaganje RAO u duboke bušotine izbušene s površine terena.

Slika 3 prikazuje tipični koncept kopanog odlagališta koji prvo podrazumijeva izradu dubokih okana do dubine matične stijene koja može iznositi i nekoliko stotina metara. Dubina pristupnih okana kontrolirana je naravno lokalnim geološkim uvjetima. Na razini matične stijene zatim se izrađuju horizontalne prostorije (tuneli) koje služe za pristup do odlagališnog prostora. Spremnike s RAO-om moguće je odlagati u horizontalne ili vertikalne prostorije koje se kopaju ili buše iz pristupnih tunela. Prostor između matične stijene i spremnika se ispunjava prikladnim brtvjenim materijalom (npr. bentonitna ispunja).

Sigurnost dubokog geološkog odlagališta primarno ovisi o prirodnim značajkama matične stijene. Dok inženjersku barijeru možemo izgraditi prema projektnim specifikacijama, na prirodne značajke geološke barijere ne možemo bitnije utjecati. Zbog toga je vrlo važno posvetiti dužnu pažnju izboru lokacije odlagališta i njenoj karakterizaciji odnosno provesti odgovarajuće istražne radove.

Matična stijena treba pružiti stabilne hidrauličke, mehaničke i geokemijske uvjete u prostoru budućeg odlagališta. Da bi se ti uvjeti ispunili, geološka formacija bi trebala imati dovoljnu debljinu, dubinu i protezanje, tektonsku stabilnost (daleko od aktivnih rasjeda) i nisku seizmičku aktivnost, jednostavnu građu i litološku homogenost, nisku vodopropusnost i niske hidrauličke gradijente, te odgovarajuća svojstva retencije radionuklida (Gens i Thomas 2006).

Geološke formacije koje najčešće ispunjavaju navedene uvjete su eruptivne stijene, glinovite stijene (plastične gline i glinenci) i ležišta kamene soli (Gens i Thomas 2006).

Eruptivne stijene (npr. graniti) karakterizira slaba propusnost (pod uvjetom niske ispucalosti), visoka kemijska stabilnost, niska ekonomska vrijednost stijene, kao i značajna čvrstoća. Iskop je zato relativno jednostavan i zahtijeva minimalnu podgradu, ali neprikladna tehnika iskopa može uzrokovati stvaranje novih pukotina koje nemaju mogućnost samozacijeljenja. Ove vrste matičnih stijena se razmatraju u mnogim europskim zemljama (Češka, Finska, Švedska, Francuska, Španjolska,

Švicarska, Ukrajina) kao i drugdje (Kanada, Kina, Indija) (Whiterspoon 1996).

Glinovite stijene koje su interesantne za duboko geološko odlaganje kreću se u širokom rasponu od plastičnih gлина do glinenaca. Njihovo ponašanje u vezi pronosa radionuklida je posve drugačije od eruptivnih stijena. Plastične gline imaju sposobnost samozacijeljenja pukotina koje se mogu pojaviti tijekom gradnje (Barnichon i Volckaert 2002) ili u drugim fazama eksploatacije odlagališta. Pukotine u glinencima pak mogu ostati otvorenim kroz dugi vremenski period. Glinovite stijene općenito karakteriziraju niska vodopropusnost i značajna svojstva usporavanja pronosa otopljenih tvari. Njihova čvrstoća nije velika te je zbog toga potrebna značajna količina podgrade tijekom iskopa i gradnje podzemnih prostorija. U glinencima može biti problematična pojava pukotina tijekom iskopa. Njihov kapacitet samozacijeljenja je nepouzdan, a mahom ovisi o udjelu bubrivih minerala i njihovom stupnju cementacije. Glinovite stijene su također osjetljive na kemijske promjene kao npr. pojavu oksidacije tijekom ventilacije odlagališta. Ovi tipovi stijena se razmatraju za potrebe dubokog geološkog odlaganja u Bjelorusiji, Belgiji, Francuskoj, Mađarskoj, Španjolskoj i Švicarskoj (Whiterspoon 1996).

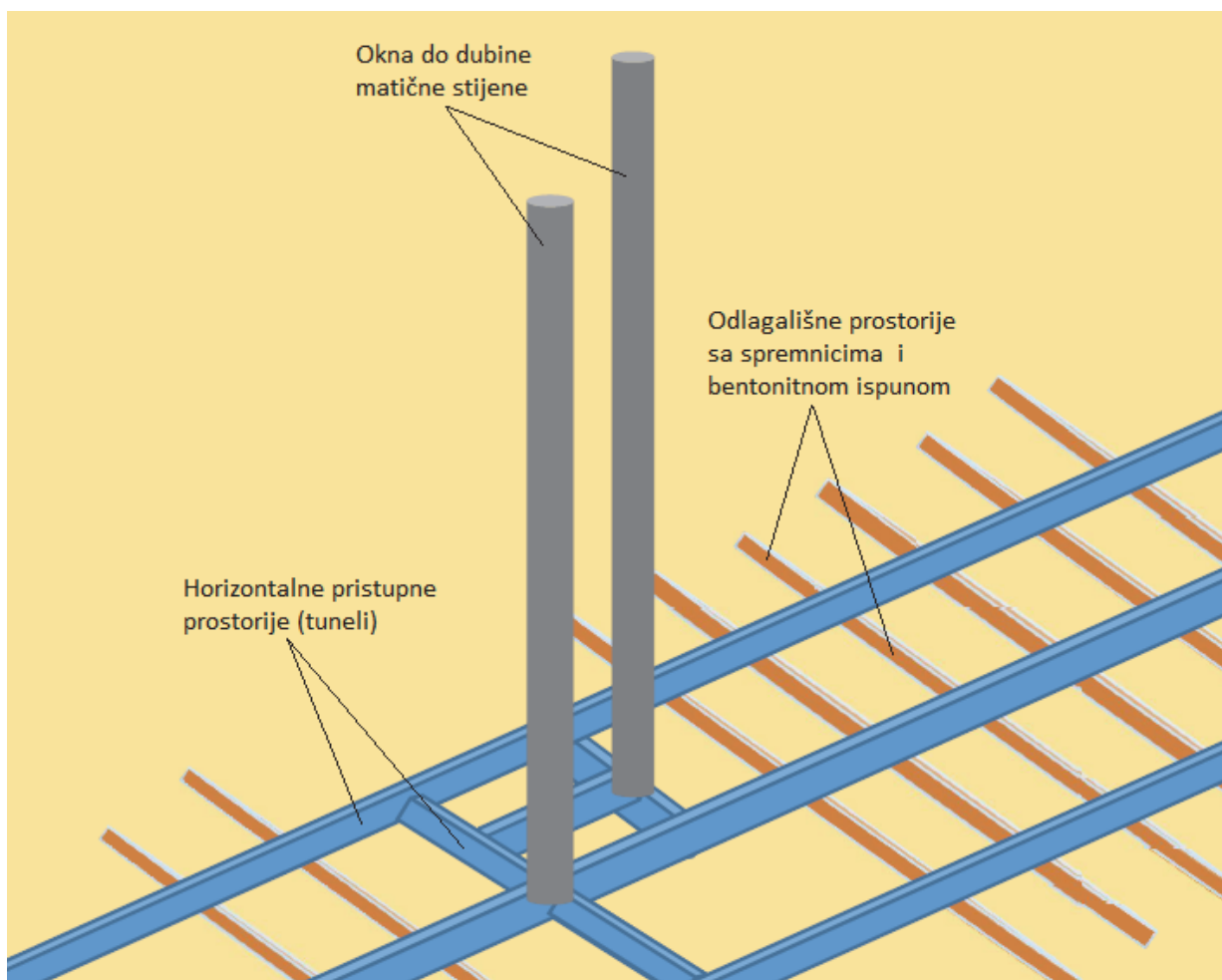
Kamena sol također ima vrlo nisku propusnost, a zbog značajnog puzanja (povećavanje deformacija pri kon-

stantnom opterećenju) sol vjerojatno ima sposobnost samozacijeljenja (Gens i Thomas 2006). Odlagalište građeno u ležištima kamene soli je vrlo osjetljivo na eventualne prodore svježe vode zbog opasnosti izluživanja soli. Osim toga, podzemne prostorije u kamenoj soli mogu zahtijevati ugradnju podgrade. Zemlje koje istražuju ovu mogućnost su Njemačka, Bjelorusija, Danska, Nizozemska i Ukrajina (Whiterspoon 1996).

Da bi se osigurao zahtijevani stupanj izolacije RAO, projekti dubokih geoloških odlagališta općenito usvajaju koncept višestrukih barijera. Dvije glavne komponente takvog koncepta su inženjerski barijerni sustav (IBS) i prirodna (geološka) barijera.

IBS podrazumijeva čvrstu matricu otpada (npr. vitrificirani RAO), metalni spremnik i odgovarajući materijal ispune koji se nalazi u prostoru između spremnika i matične stijene. Prirodnu barijeru čine matična stijena i ostatak geosfere sa sustavom podzemne vode koji okružuju odlagalište (Gens i Thomas 2006).

Izvorno se promišljalo da bi svaki element inženjerskog barijernog sustava trebao biti projektiran tako da pruži dovoljnu izolaciju sam po sebi, tako da bi do značajnog ispuštanja radionuklida u okoliš moglo doći tek nakon što svi elementi sustava zakažu. Takav pristup je prerestriktivan i vjerojatno nemoguć za ostvariti. Razumnije je razmatrati ukupno djelovanje svih elemenata barijernog sustava (Gens i Thomas 2006).



Slika 3. Koncept dubokog geološkog odlagališta RAO.

Postojeći koncepti višestrukih barijera za duboka odlagališta VRAO općenito predviđaju bentonitnu ispunu u prostoru između spremnika i matične stijene. Vitrificirana matrica otpada tj. staklo bi trebalo imati visoku otpornost na radioaktivno djelovanje i koroziju. Sljedeći element barijernog sustava je metalni spremnik (**slika 2**) koji bi trebao jamčiti dugotrajnu izolaciju RAO od nekoliko tisuća godina. Produkti koji nastaju korozijom spremnika bi trebali osigurati povoljne kemijske uvjete za izolaciju otpada u ovakvom sustavu. Da bi sustav bio što dugovječniji u nekim projektima predviđa se korištenje spremnika od bakra ili titana za koje se procjenjuje da mogu izolirati RAO i nekoliko desetaka tisuća godina (Gens i Thomas 2006).

Bentonitna ispunna (barijera) ispunjava nekoliko važnih funkcija u sustavu dubokog odlagališta. Kao prvo ograničava dotok vode zbog vrlo niske hidrauličke provodljivosti. Značajno usporava pronos otopljenih tvari zbog niskog koeficijenta difuzije i dodatnog visokog kapaciteta sorpcije. Osigurava povoljne kemijske uvjete za dugotrajnu izolaciju RAO te posjeduje sposobnost samozacijeljenja pukotina i prslina koje bi eventualno mogle nastati zbog mehaničkog poremećaja (Gens i Thomas 2006).

Prirodnu barijeru čini prvenstveno odabrana matična stijena u koju je smješteno odlagalište te ostatak geosfere. Ostatak geosfere koji okružuje odlagalište i matičnu stijenu idealno bi trebao osigurati vrlo dugo vrijeme procjeđivanja podzemne vode na putu do biosfere uz značajnu sposobnost usporavanja i razrjeđivanja ispuštenih radionuklida (preko sorpcije i matične difuzije) te dugoročnu stabilnost hidrogeoloških uvjeta. Trebalo bi napomenuti da usporavanje pronosa radionuklida smanjuje problem zbog raspada radioaktivnog materijala.

Gradnja odlagališta obično uključuje iskop vertikalnih pristupnih okana i mreže horizontalnih pristupnih prostorija (tunela). Iz horizontalnih pristupnih prostorija buše se vertikalne ili horizontalne prostorije koje su namijenjene za odlaganje RAO.

Velika dubina odlagališta danas ne predstavlja problem za raspoložive tehnologije iskopa i gradnje podzemnih prostorija. Međutim, projekt i gradnja odlagališta VRAO ima određene specifičnosti koje se ne javljaju u konvencionalnim, rudarskim ili građevinskim projektima. Na primjer, metode iskopa i podgrađivanja podzemnih prostorija mogu imati veliki utjecaj na poremećaj i oštećenja (nastanak pukotina) stijenske mase u neposrednoj blizini podzemnog otvora koja općenito ne trebaju imati bitnog značaja za mehaničku stabilnost prostorije, ali otvaraju nove, preferencijalne puteve za pronos radionuklida u budućem odlagalištu koje svakako treba izbjeći (Gens i Thomas 2006).

Smanjenje negativnog utjecaja iskopa na stijenu odnosno sprječavanje njenog oštećivanja može se postići tako da se konvencionalne tehnike bušenja i miniranja zamjene tehnikama strojnog iskopa kao što je npr. TBM (Tunnel Boring Machine) tj. iskop krticom. Isto tako, ranom ugradnjom odgovarajuće podgrade kao i korištenjem ekspanzivne ispune moguće je spriječiti ili umanjiti poremećaje i oštećenja stijene koja se javljaju zbog preraspodjele naprezanja u okolini podzemnog otvora. Treba imati na umu da će u odlagalištu kroz dugo

vrijeme postojati snažni izvori topline (VRAO) tako da će ispunna (npr. bentonit) i okolna matična stijena biti izloženi termalno-hidrauličko-mehaničkim djelovanjima.

Desaturacija stijene sušenjem, do koje dolazi tijekom iskopa i eksploatacije odlagališta, može biti problematična jer može uzrokovati promjenu strukture i pojavu pukotina u matičnoj stijeni odnosno povećanje njene propusnosti u zoni oko podzemne prostorije. Sušenje stijene može biti posljedica provjetravanja (ventilacije) prostorija, ali i kasnije zbog pojave visokog usisa u nezasićenoj bentonitnoj ispuni. Potreba za kontrolom ventilacije tijekom iskopa i gradnje mora biti prepoznata jer može dovesti i do kemijskih promjena u nekim stijenama uslijed oksidacije osjetljivih minerala (npr. pirit).

U fazi konačnog zatvaranja dubokog odlagališta potrebno je zabrtviti i ispuniti pristupne prostorije i okna tako da se onemoguće putevi migracije radionuklida. Pri tome je potrebno osigurati nisku propusnost ugrađenih brtvenih čepova, dugoročnu mehaničku stabilnost podzemnih prostorija, dodatna mjesta za sorpciju radionuklida te mehaničku zaštitu od neželjenog ljudskog pristupa (npr. teroristi).

Problemi koji se javljaju pri odlaganju NRAO i SRAO razlikuju se od odlaganja VRAO i znatno ih je lakše riješiti. Osnovna razlika je u tome da NRAO i SRAO ne emitiraju značajne količine topline jer su u njima uglavnom prisutni kratkoživući radionuklidi čija je aktivnost niska do umjerena. Međutim, za razliku od VRAO, ovi otpadi mogu proizvoditi znatne količine plina koji je posljedica raspada organske materije i korozije metala u otpadu ili metalnih spremnika pa o tome treba voditi računa pri odlaganju. U pogledu zahtjeva za odlaganje, NRAO i SRAO su tako više slični konvencionalnom opasnom otpadu tako da se i odlažu na sličan način kao potonji. Odlaganje ovih otpada je uglavnom površinsko ili plitko podzemno, a prati ga također ugradnja višestrukih barijera i odgovarajućeg drenažnog sustava.

S geotehničkog aspekta problematika odlaganja NRAO i SRAO odnosi se na potrebu dobrog poznavanja hidrogeoloških uvjeta lokacije, zadovoljenje mehaničke stabilnosti odlagališta te izvedbu temeljnih i pokrovnih barijernih i drenažnih sustava. Otpad se nastoji odlagati iznad razine podzemne vode i izvan zone plavljenja, a posebno treba izbjegavati situacije pri kojima bi razina podzemne vode oscilirala u zoni odloženog otpada. Otpad može biti odložen i ispod razine podzemne vode pod uvjetom da je okolno tlo vrlo niske vodopropusnosti.

U nekim slučajevima odlagališta NRAO i SRAO se smještaju uz postojeća nuklearna postrojenja kao npr. Drigg (Velika Britanija), Centre de la Manche (Francuska), Rokkasho (Japan), Olkiluoto (Finska)), dok druge zemlje razmatraju mogućnost izgradnje zajedničkih odlagališta.

Za razliku od dubokih geoloških odlagališta koja su za sada u svijetu samo u fazi istraživanja, plitka odlagališta za NRAO i SRAO, na dubinama većim od 50 metara, su već u eksploataciji dugi niz godina. U Švedskoj je 1989. izgrađeno odlagalište u gnajsima na dubini od 60 metara ispod Baltičkog mora. U Finskoj, na otočiću Olkiluoto, izgrađeno je odlagalište u granitima na dubini od 60 do 100 metara ispod površine i pušteno u rad 1992. NRAO i

SRAO se smješta u iskopane silose promjera 24 m i visine 34 m (slika 4).

Varijantu površinskog odlagališta predstavlja zidana betonska građevina koja može biti plitko ukopana ili sagrađena iznad površine terena. Odlagalište se sastoji od kazeta koje se redom popunjavaju spremnicima s otpadom. Odloženi spremnici s otpadom zaliju se betonom (betonski monolit) što predstavlja standardizirano rješenje odlaganja otpada srednje i niske aktivnosti. Takva monolitna struktura odlagališta se obično prekriva s nekoliko slojeva prirodnih i geosintetičkih materijala.



Slika 4. Silos s odloženim spremnicima RAO u odlagalištu Olkiluoto u Finskoj.

Kao materijali za izradu pokrova uglavnom se koriste različiti zemljani materijali i geosintetičke folije (geomembrana). Time se dodatno formira još jedna inženjerska barijera. Nužno je osigurati dobru drenažu za prikupljanje oborina i površinskih voda kako bi se spriječio njihov prodor u odlagalište.

Neke zemlje odabrale su varijantu dubokog geološkog odlaganja za NRAO i SRAO kao npr. odlagalište u nekadašnjem rudniku soli u Morsleben u Njemačkoj. To odlagalište je pušteno u rad još davne 1981. i zatvoreno 1998. U to vrijeme je korištenje napuštenog rudnika za potrebe odlaganja RAO ocjenjeno kao tehnički i ekonomski prihvatljivo rješenje. Međutim, kako se radi o starom rudniku, ležište soli je znatno poremećeno rudarskim radovima te se s vremenom pojavio problem stabilnosti ležišta. Zbog znatnih deformacija i opasnosti od većih prodora vode u prostor odlagališta, Njemačka je utrošila oko 2,2 milijarde Eura na radove sanacije (WNA 2016).

3. PROCJENE SIGURNOSTI ODLAGALIŠTA

Cilj procjene sigurnosti odlagališta je kvantitativno demonstrirati sposobnost odlagališta za sigurnu i učinkovitu izolaciju VRAO izvan biosfere kroz vrlo duga vremenska razdoblja.

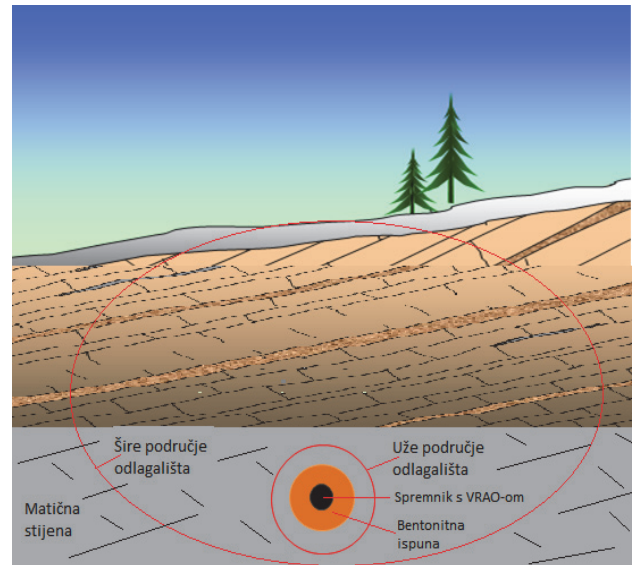
Pod pretpostavljenim scenarijima djelovanja čimbenika unutar odlagališta i izvan njega, rezultat procjene bi trebao pokazati da će promjene efektivnih vrijednosti zračenja (uslijed oslobađanja pojedinih radionuklida) kao i ukupne doze zračenja biti niže od dopuštenih vrijednosti

koje su ustanovljene važećom regulativom o zaštiti okoliša. Takvo stanje bi se trebalo zadržati kroz čitavo vremensko razdoblje, reda veličine 10.000 – 1.000.000 godina, unutar kojeg su dugoživi radionuklidi toksični i opasni po zdravlje čovjeka i okoliš.

Procjena sigurnosti na temelju numeričke analize ponašanja dubokog geološkog odlagališta predstavlja tako vrlo kompleksan zadatak zbog činjenice da takav sustav uključuje veliki broj različitih materijala, čimbenika i međudjelujućih procesa koji se pojavljuju i razvijaju kroz enormno duga vremenska razdoblja u kojim se mogu odigrati i različiti scenariji pod utjecajem promjenjivih vanjskih čimbenika (Gens i Thomas 2006). Sve njih naravno nije moguće opisati jedinstvenim, sveobuhvatnim numeričkim modelom. Potrebno je definirati i odgovarajuće opisati samo one čimbenike i procese u predvidivim scenarijima koji imaju znatnog utjecaja na ponašanje odlagališta odnosno definirati zbir glavnih čimbenika i procesa koji čine takozvani referentni sustav.

Takav sustav je moguće podijeliti na uže i šire područje (slika 5) koji se opisuju i analiziraju zasebno.

Uže područje odlagališta uključuje spremnik, bentonitnu ispunu i dio matične stijene koji se nalaze pod izravnim utjecajem odloženog VRAO. Jasnu granicu između užeg i šireg područja odlagališta nije moguće definirati. Ponašanje vitrificirane matrice VRAO i metalnog spremnika tijekom procesa korozije se obično razmatra zasebno (znanost o materijalima).



Slika 5. Uže i šire područje dubokog geološkog odlagališta RAO.

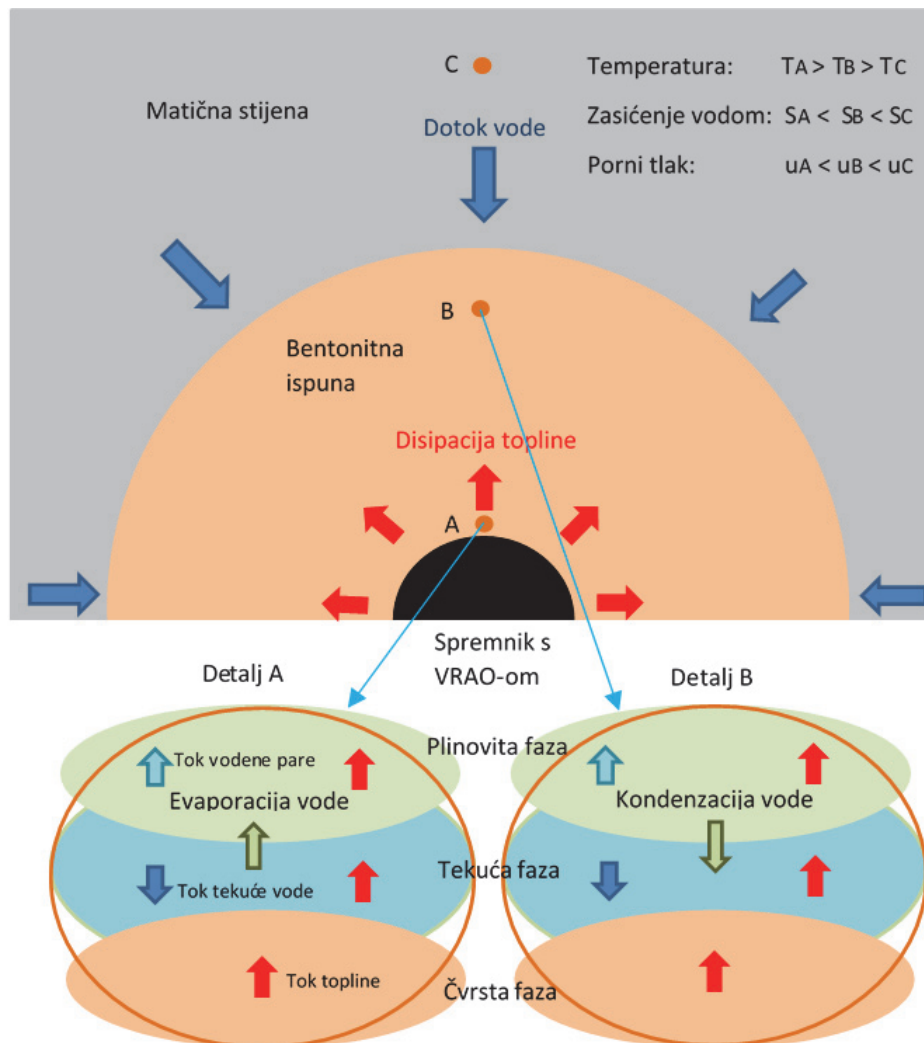
Šire područje odlagališta obuhvaća matičnu stijenu i ostatak geosfere (sve litološke jedinice) do površine terena koja se nalazi u kontaktu s biosferom.

Bentonitna ispuna, koja čini tzv. inženjersku brtvenu barijeru, ugrađuje se u podzemnoj prostoriji između spremnika s VRAO-om i okolne matične stijene, a inicijalno se nalazi u nezasićenom stanju što znači da su tu prisutne sve tri faze materije: čvrsta (bentonit i ostala mineralna ispuna), tekuća (voda s otopljenim tvarima) i plinovita (zrak, plinovi i vodena para). Ponašanje takvog višefaznog sustava je vrlo kompleksno, a naročito u

uvjetima promjene temperature zbog isijavanja topline iz odloženog VRAO.

Ispuna je od unutarnje granice (kontakt spremnika i ispune) izložena toku topline koji se širi kroz sve tri faze

materije prema matičnoj stijeni, a u suprotnom smjeru, javlja se dotok tekuće vode iz matične stijene zbog postojanja usisa (negativnog pognog tlaka) u ispuni (slika 6).



Slika 6. Procesi disipacije topline i hidratacije bentonitne ispune u užem području odlagališta VRAO.

Disipacija topline ovisi o toplinskoj provodljivosti ispune odnosno o njenom zasićenju vodom i poroznosti. Zbog grijanja ispune uz spremnik postoji i tok vodene pare kroz plinovitu fazu u smjeru tečenja topline odnosno suprotno od smjera dotoka tekuće vode koji predstavlja dio kružnog kretanja vode. Ispuna se uz unutarnju granicu steže zbog grijanja i evaporacije vode, a uz vanjsku (kontura matične stijene) bubri zbog hidratacije bentonita.

U konačnici, ispuna bi trebala biti zasićena vodom što će rezultirati bubrenjem bentonita i značajnim tlačnim naprežanjem na matičnu stijenu. Ovakvo ponašanje ispune opisuje se složenim termo-hidro-mehaničkim spregom koji su razvijali brojni istraživači kao npr. Gawin i dr. 1995; Olivella i dr. 1994; Olivella i dr. 1996; Thomas i He, 1995. Razvoj i kalibracije ovih modela (npr. Gens i dr. 2009; Garitte i dr. 2014) temelje se na rezultatima međunarodnih znanstvenih istraživanja koja se intenzivno

provode u zadnjih 20-tak godina u podzemnim stijenskim laboratorijima kao što su npr. Mont Terri i Grimsel u Švicarskoj, Äspö Hard Rock u Švedskoj i dr.

Brzina propadanja vitrificirane matrice VRAO i metalnog spremnika uslijed korozije te topljivost matrice VRAO u vodi kontroliraju brzinu oslobađanja radionuklida u tzv. užem području odlagališta (Gens i Thomas, 2006). Radionuklidi koji su otopljeni u vodi mogu migrirati kroz odlagalište uslijed mehanizama advekcije i difuzije.

Advekcijom nazivamo proces pronosa onečišćenja otopljenog u podzemnoj vodi koji je posljedica tečenja podzemne vode pod djelovanjem hidrauličkog gradijenta. Kao i protok podzemne vode, advekcija isključivo ovisi o hidrauličkim svojstvima poroznog medija kao što su provodljivost, efektivna poroznost i hidraulički gradijent, a ne ovisi o fizikalno-kemijskim svojstvima onečišćenja.

Difuzija je proces pronosa onečišćenja zbog gradijenta koji je posljedica različite koncentracije tog spoja u podzemnoj vodi, a ne zbog hidrauličkog potencijala. Difuzija tako predstavlja glavni mehanizam širenja onečišćenja u uvjetima niske propusnosti poroznog medija. Zbog vrlo male propusnosti bentonitne ispune i posljedično male brzine tečenja, proces difuzije je odgovoran za pronos radionuklida kroz brtvenu barijeru. Osim toga, brzina pronosa radionuklida je uvjetovana i geokemijskim utjecajima barijere i matične stijene tj. procesima usporavanja pronosa kao što su adsorpcija radionuklida na površinu čvrstih čestica, procesi taloženja iz otopine i dr. Modele pronosa radionuklida u užem području odlagališta koji se oslanjaju na THM model ponašanja barijere razvijali su Guimaraes i dr. 1999; Gens i dr. 2002; Thomas i dr. 2002. Poboljšanja ovih modela koja uključuju i kemijske reakcije (hidroliza, oksidacija, redukcija, taloženje i dr.) u bentonitnoj ispuni (tzv. termo-hidro-mehaničko-kemijski spreg) razvili su: Gens i dr. 2010; Zheng i dr. 2010. Rezultat takvih numeričkih simulacija za uže područje odlagališta je prognoza brzine otpuštanja radionuklida u šire područje odlagališta tj. izlaz numeričkog modela užeg područja postaje ulazna veličina za model pronosa radionuklida širim područjem.

Modeliranje pronosa radionuklida širim područjem odlagališta oslanja se na hidrogeološki model procjeđivanja podzemne vode koji uključuje matičnu stijenu i sve ostale litološke jedinice do granice s biosferom (Gens i Thomas 2006). Zbog toga je vrlo važna kvalitetna hidrogeološka karakterizacija šireg područja odlagališta. Njome treba odrediti: hidrauličku provodljivost stijena, efektivnu poroznost koja sudjeluje u tečenju podzemne vode, eventualno postojanje preferencijalnih puteva kretanja vode (pukotinska poroznost), hidrauličke gradijente i dr. Radionuklidi koji su otopljeni u vodi ili su adsorbirani na druge otopljene tvari i ovdje su podložni procesima advekcije i difuzije kao i fizikalnim i kemijskim interakcijama sa stijenama kojima prolaze, te procesima disperzije i usporavanja pronosa (Gens i Thomas 2006).

5. ZBRINJAVANJE RAO U RH

Hrvatska (RH) je kao članica Europske unije preuzela odgovornost za uspostavu nacionalnog sustava za sigurno zbrinjavanje RAO, koji nastaje na njenom teritoriju. Isto tako, RH je kao suvlasnik polovine Nuklearne elektrane Krško (NEK), koja se nalazi u susjednoj Sloveniji, preuzela obavezu zbrinjavanja polovine količine RAO iz NEK na svom teritoriju.

RH trenutno ima dva mala skladišta u kojima se čuva manja količina (7,5 m³) institucionalnog RAO i oba skladišta su sada zatvorena odnosno ne mogu više zaprimati otpad. Prihvat prvih količina RAO iz NEK-a se planira već za 2023., a razgradnja NEK-a za 2043. Pri tome RH još uvijek nema definitivnu lokaciju bilo centralnog skladišta ili odlagališta. ING odnosno ukupno 2283 gorivna elementa koji će se iskoristiti do kraja životnog vijeka NEK-a planiraju se skladištiti na lokaciji elektrane predvidivo do kraja stoljeća. RH nakon toga mora preuzeti brigu i za polovinu gorivnih elemenata.

Proces izbora lokacije odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada u RH započeo je 1988. i trajao do 1997.

Višekriterijskom analizom tj. primjenom izlučnih i usporedbenih kriterija vrednovan je čitav teritorij RH te su izdvojene ukupno 34 potencijalne lokacije odlagališta RAO (Schaller 1997). Primjenom tzv. izlučnih kriterija vrednovana su sljedeća svojstva lokacija: sigurnost od poplave, ugroženost od potresa, udaljenost od aktivnih rasjeda, litološka i geomorfološka svojstva, hidrogeologija, gustoća naseljenosti, zahtjevi nacionalne obrane, rudarska eksploatacija, zaštita prirodne i kulturne baštine. Korišteni usporedbeni kriteriji (ukupno 28 kriterija) mogu se svrstati u šest skupina: 1) prijevoz RAO, 2) meteorologija i hidrologija, 3) geologija i seizmologija, 4) demografija, 5) namjena i korištenje prostora i 6) zaštita okoliša.

Među potencijalnim lokacijama, navedenim procesom izbora 1997. su izdvojene četiri preferentne lokacije s približno ujednačenim karakteristikama. To su: Trgovska gora, Moslavačka gora, Papuk i Psunj. Nakon toga, proces izbora je praktično mirovao dugi niz godina da bi pred dvije godine bila izdvojena samo jedna preferentna lokacija na Trgovskoj gori ili preciznije Čerkezovac u vlasništvu Hrvatske vojske. Međutim, izboru ove lokacije se jako protivi lokalna zajednica. Blizina rijeke Une i granice s Bosnom i Hercegovinom koriste se kao glavni argumenti protiv izbora te lokacije.

S druge strane, Slovenija je odabrala lokaciju Vrbina u blizini NEK za odlaganje NRAO i SRAO. Ova lokacija je smještena u zagrebačkom vodonosniku i poplavnom području. Po prethodnim kriterijima ovakva lokacija u RH ne bi se razmatrala ni kao potencijalna. Odlagalište u Vrbini se uglavnom oslanja na inženjerski barijerni sustav što podrazumijeva veći rizik po okoliš. Na toj lokaciji uskoro će se izgraditi dva silosa kapaciteta 9400 m³ u koje će Slovenija odložiti svoj dio nisko i srednje radioaktivnog otpada iz NEK-a kao i ostali RAO iz Slovenije. Lokalna zajednica je prihvatila ovaj projekt odlagališta u Vrbini uz uvjet da joj se plaća ekološka renta od 5 milijuna Eura godišnje (WNA 2016). Na ovoj lokaciji moguće bi bilo izgraditi i dodatne silose za hrvatski dio otpada iz NEK-a. Međutim, protivnici ovog rješenja navode da je ono financijski nepovoljno za RH (procijenjeni trošak oko pola milijarde Eura) i da se njime neće moći riješiti postojeće i buduće količine RAO u RH.

Hrvatska je nažalost izgubila puno dragocjenog vremena i sada mora brzo riješavati problem skladištenja i odlaganja nisko i srednje RAO. Na sreću, potencijalne lokacije odlagališta su kvalitetno definirane i ne treba kretati ispočetka. Odabrano rješenje mora biti prihvatljivo za lokalnu zajednicu i po mogućnosti ono bi trebalo omogućavati i rješavanje budućih obveza RH prema odlaganju VRAO i ING iz NEK-a. Ekonomska logika nalaže udruživanje sa slovenskom stranom radi smanjivanja ukupnih troškova u zbrinjavanju RAO za obje strane, ali tu se nažalost ne mogu isključiti ili zanemariti brojni drugi čimbenici. U interesu RH je da bude uključena u sve aktivnosti oko NEK-a i da tako kontrolira čitav proces njene razgradnje i zbrinjavanja ukupne količine RAO iz elektrane koja se nalazi u njenoj neposrednoj blizini. U slučaju bilo kakve havarije u elektrani ili u zonama skladištenja ING-a i RAO-a Hrvatska je nažalost neposredno ugrožena.

Za efikasno rješavanje ovih problema možda bi bilo uputno da RH potraži pomoć u zemljama koje su takve

probleme uspješno rješile kao npr. Finska. Finska iz vlastitih nuklearnih reaktora osigurava oko 30% potrebne električne energije. Ona je odavno rješila problem odabira lokacije i odlaganja nisko i srednje radioaktivnog otpada (Olkiluoto u radu od 1992.), a kao prva u svijetu rješit će i problem odlaganja ING-a i VRAO u duboko geološko odlagalište Onkalo koje bi s radom trebalo započeti već 2020. Stav društvene zajednice u Finskoj, kako one šire tako i lokalne (u okolini odlagališta), prema nuklearnoj energiji i odlaganju RAO je općenito pozitivan (WNA 2016). Razlozi tomu su vjerojatno: dobra informiranost stanovništva na polju nuklearne energije i RAO, transparentnost politike i demokratičnost u donošenju odluka, pozitivna domaća iskustva i općenito postojanje povjerenja javnosti u rad kompanija koje se bave proizvodnjom nuklearne energije i gospodarenjem RAO. Finska ima potrebna znanja, vještine i tehnologiju koje su uspješno razvijali u zadnjih 30-tak godina. Primjera radi, češka agencija "Czech Radioactive Waste Repository Authority" (SURA) je ove godine potpisala četverogodišnji ugovor s finskim partnerima za konzultantske usluge u procesu odabira lokacije odlagališta, te koncepta i projekta budućeg češkog odlagališta RAO.

Uz takvu potporu je vjerojatno moguće ubrzati proces izbora lokacije, izbjeći krive korake, smanjiti troškove i što je vrlo važno zadobiti povjerenje lokalne zajednice kada se pokaže da će na budućem projektu odlagališta biti uključen partner koji ima sva potrebna znanja i iskustva te da će se na projektu primjenjivati samo sigurna i već provjerena tehnička rješenja. Osim toga, lokalna zajednica mora biti dobro informirana o svim aspektima odlaganja RAO i rizicima koje ono nosi kao i tehničkim rješenjima kojima se rizici svode na minimum. Lokalna zajednica mora vidjeti koristi od postojanja odlagališta na svom području u vidu mogućnosti novog razvoja financiranog iz ekološke rente i novih mogućnosti zapošljavanja na njenom području, uostalom kao i u slovenskom primjeru.

6. ZAKLJUČAK

Jedan od najvažnijih koraka u procesu zbrinjavanja RAO je odabir prirodno povoljne lokacije odlagališta. Osnovna zadaća odlagališta je sigurno izolirati radioaktivni materijal od okoliša, odnosno spriječiti eventualnu emisiju radionuklida u biosferu. To se postiže obradom i kondicioniranjem otpada te ugradnjom višestrukih slabopropusnih barijera između radioaktivnog otpada i okolnog geološkog medija. Sigurnost odlagališta se značajno povećava ako okolna geološka formacija ima odgovarajuća svojstva niske vodopropusnosti i usporavanja širenja radionuklida u okoliš, te tektonsku stabilnost i nisku seizmičku aktivnost.

Međutim, odabir lokacije budućeg odlagališta RAO je dugotrajan i skup proces na koji utječu brojni čimbenici. Proces odabira lokacije bi trebala usmjeravati „struka“, ali on mora biti transparentan, javan i demokratičan, tako da uključuje sve dionike procesa. Lokalna zajednica mora biti potpuno informirana i educirana u ovoj problematici, ali i odgovarajuće motivirana da bi prihvatila ideju odlagališta RAO-a u svojoj okolini. Pri tome je vrlo važno stjecanje povjerenja u budući projekt odlagališta što se može postići

uključivanjem konzultanta sa znanjem i dokazanim iskustvom u poslovima projektiranja, gradnje i eksploatacije odlagališta niskog i srednje radioaktivnog otpada.

Problemi koji se javljaju pri odlaganju NRAO i SRAO razlikuju se od odlaganja VRAO i znatno ih je lakše riješiti. U pogledu zahtjeva za odlaganje, NRAO i SRAO su tako više slični konvencionalnom opasnom otpadu tako da se i odlažu na sličan način kao potonji. Odlaganje ovih otpada je uglavnom površinsko ili plitko podzemno. Provjerena i sigurna tehnička rješenja za takva odlagališta postoje i mogu biti realizirana od domaćih stručnjaka, ali nije na odmet da investitor angažira konzultanta s dokazanim iskustvom.

Mogućnosti procjene sigurnosti odlagališta ovise o našoj sposobnosti da predvidimo sve moguće scenarije kao i ponašanje relevantnih čimbenika pod takvim scenarijima u budućem odlagalištu i širem okolišu, o dosegnutoj razini znanja koja dobivamo iz istraživanja ponašanja barijernog sustava i okolne stijene koja se provode pokusima 1:1 u podzemnim laboratorijima (npr. Mont Terri i dr.), o kvaliteti i kvantiteti istražnih radova koja se obave na budućem odlagalištu i dr.

7. LITERATURA

Gens, A., Thomas, H.R. (2006): Nuclear Waste. Ch. 7 in TC5 Report: Environmental Geotechnics. Edited by International Technical Committee No. 5 of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

Mc Combie, Pentz DL, Kurzeme M, Miller I. (2000): Deep geological repositories: A safe and secure solution to disposal of nuclear wastes, GeoEng2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne. Technomic Publishing, Lancaster Pa, 1. pp. 686-691.

WNA (2016): World Nuclear Association, [http:// world-nuclear.org/information-library/country-profiles/...](http://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/)

Whiterspoon, P. (ed.) (1996): Geological problems for radioactive waste isolation: second world-wide review. Report LBNL-38915, UC-814, University of California, USA.

Barnichon JD, Volckaert G. (2002): Hydro-mechanical coupling in the Boom Clay (Mol URL, Belgium): Recent in-situ observations, predictions and perspectives. Hydromechanical and Thermohydromechanical Behaviour of Deep Argillaceous Rock (Hoteit, N. et al. eds), A:A. Balkema, Lisse. pp. 285-294.

Gawin, D., Baggio, P. and Schrefler, B.A. (1995): Coupled heat, water and gas flow in deformable porous media. Int. J. Num. Meth. Fluids. 20: 967-987.

Olivella, S., Carrera, J., Gens A. and Alonso, E.E. (1994): Non-isothermal Multiphase Flow of Brine and Gas through Saline media. Transport in Porous Media. 15: 271-293.

Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. and Alonso, E.E. (1996): Numerical Formulation for a Simulator (Code bright) for the Coupled Analysis of Saline Media. Engineering Computations. 13: 87-112.

Thomas, H.R. and He, Y. (1995): An analysis of coupled heat, moisture and air transfer in a deformable unsaturated soil, Géotechnique. 45: 667-689.

Gens, A., Sánchez, M., Guimaraes, L. do N., Alonso, E.E., Loret, A., Olivella, S., Villar, M.V., Huertas, F. (2009): A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: observations, analysis and interpretation. Géotechnique 59:377-399.

Garitte, B., Gens, A., Vaunat, J., Gilles, A. (2014): Thermal Conductivity of Argillaceous Rocks: Determination Methodology Using In Situ Heating Tests. Rock Mech Rock Eng. 47: 111.

Guimaraes, L. N., Gens, A. and Olivella, S. (1999): THM and reactive coupling in unsaturated porous media. 7th Int. Symp. Numerical Models in Geomechanics, Graz, Austria. pp. 303-308.

Gens, A., Guimaraes, L. do N., Garcia-Molina, A., Alonso, E.E. (2002): Factors controlling rockclay buffer interaction on a radioactive waste repository. *Engineering Geology*. 64: 297-308.

Thomas, H.R., Cleall, P.J. and Hashm, A.A. (2002): Thermal/hydraulic/chemical/ mechanical (THCM) behaviour of partly saturated soil. *Computer Methods and Advances in Geomechanics* (Desai et al., eds), A.A. Balkema, Rotterdam. 1, pp. 756-763.

Gens A, Guimaraes L, Olivella S, Sanchez M (2010): Modelling thermo-hydro-mechano-chemical interactions for nuclear waste disposal. *J Rock Mech Geotech Eng*. 2:97-102.

Zheng, L., Samper, J., Montenegro, L, Fernandez, A.M. (2010): A coupled THMC model of a heating and hydration laboratory experiment in unsaturated compacted FEBEX bentonite. *J Hydrol*. 386(1-4):80-94.

Schaller, A. (1997): Izbor mjesta odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj, APO novosti, Agencija za posebni otpad, Zagreb.

GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA NA TVRĐAVI „MINČETA“, DUBROVNIK, HRVATSKA

GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF THE FORTRESS “MINČETA”, DUBROVNIK, CROATIA

Kristijan Grabar^{1*}, Željko Miklin², Stjepan Strelec³

¹ SPP d.o.o. Trstenjakova 3, 42000 Varaždin, Hrvatska

² Hrvatski geološki institut, Sachsova 2, 10000 Zagreb, Hrvatska

³ Geotehnički fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

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

Sažetak: Razna oštećenja tijekom stoljeća na tvrđavi „Minčeta“ prouzročena su, zbog djelomičnog temeljenja tvrđave na rasjedu, naknadnom izgradnjom usjeka Ulice Iza Grada, i seizmički vrlo aktivnom području. Nastala oštećenja potrebno je locirati i predložiti sanaciju kako bi se zidine sačuvale. Korišteno je nekoliko metoda istraživanja prije svega geološko kartiranje okoline i objekta, georadarsko profiliranje, električna tomografija i seizmička istraživanja višekanalnom analizom površinskih valova kao i posebna primjena "downhole" seizmičke metode mjerenjem na pokosu obloženog usjeka. Ovim metodama definirane su oslabljene zone koje su i geotehnički kategorizirane. Preporučeno je injektiranje oslabljenih zona kao zaštita od daljnje degradacije zidina.

Ključne riječi: inženjerskogeološko kartiranje, geofizička istraživanja, seizmička istraživanja

Abstract: Various damages of the fortress "Minčeta" during centuries had several causes. These are: partial foundation on the fault, additional construction works cutting the street "Iza grada" and seismic activity of the area. The resulting damage had to be located and the remediation measures were proposed to preserve the walls. Several methods of investigations were used. Geological mapping of the area was the base. Next was GPR profiling, electric and seismic investigation with multichannel analyses of surface waves and the special approach of downhole seismic measurements on the slope of the cut wall. Used methods defined the weak rock mass zones that were geotechnically categorized. Grouting of weak zones, as the protection from further degradation of walls, was proposed.

Key words: engineering geological mapping, geophysical surveys, seismic surveys

Received: 26.11.2016 / Accepted: 08.12.2016

Published online: 14.12.2016

Pregledni rad / Review paper

1. UVOD

1.1. Opće geološke značajke naslaga

U istraživanome području uz Tvrđavu Minčeta izdvojena je litostratigrafska jedinica gornje krede, kronostratigrafskog raspona od cenomana do mastrihta. Za izdvajanje litostratigrafskih jedinica korišteni su podaci dobiveni tijekom istraživanja susjednih lokaliteta, u prvome redu južnodalmatinskih otoka (Braća, Hvara, Mljet, Visa i dr.) te područja Biokova. Naravno, zbog nemogućnosti detaljnih istraživanja izdvojene su jedinice potpuno neformalne, a budući da se najvećim dijelom poklapaju s kronostratigrafskim jedinicama, zbog jednostavnijeg snalaženja prigodom primjene rezultata ovih istraživanja ravnopravno su navedeni i kronostratigrafski nazivi svake jedinice, Strelec et al. (2013).

Ove karbonatne naslage karakterizira izmjena, peloidno - skeletnih i rudistno – gastropodnih vapnenaca, tipa madston i pekston sa sporadičnim ulošcima dolomita i breča. Dobro su do debelo uslojeni (0.5-1.0m i > 1.0 m), a boja im je siva do svijetlosiva, do gotovo bijela. To su vapnenci u kojima se izmjenjuju madstoni, fenestralni madstoni, peloidno – skeletni pekstoni i intraklastični – rudisti. Stijene su pretežito vrlo svijetle, gotovo bijele boje, a sadrže bogatu mikrofosilnu zajednicu bentosnih foraminifera srednjega i mlađega cenomana. Naslage su obilježene

utjecajem otvorenijeg mora. Pretežito su to vapnenci gromadastoga habitusa, ali u izmjeni ima i proslojaka intraformacijskih karbonatnih breča. Pretežu izmjenjene padinskih bioklastičnih breča sa sitno razdrobljenim i/ili cijelim skeletima rudista i intraklastima, te rjeđim fragmentima koralja i gastropoda. U izmjeni ima mikritnih litotipova. Stijena izdvojene jedinice razlikuje se po okolišu taloženja, koji je znatno otvoreniji prema pućinskom utjecaju (padina intraplatformnoga korita), na površini pokazuje brečoliki habitus, a starost je od mlađega cenomana do gornjega turona/konijaka.

U tektonski jače poremećenim zonama duž tektonskih prslina i pukotina nastalih uslijed dijagenetskih procesa, stijene su dijagenetski promijenjene. Tako su stilolitizacijom i alokemijskim promjenama pretvorene u brečolike karbonate. Iako su takve stijene pretežito potpuno litificirane, mjestimično se zbog jačeg okršavanja mogu očekivati i kaverne.

Slijede debelo slojeviti do masivni madstoni s proslojcima wekstonu i pekstonu kronostratigrafskog raspona od g. turona do santona. Ove su naslage u rasjednom kontaktu s prethodnima, rasjedni kontakt je dijagonalni u odnosu na smjer obilazne ulice (Ulica pod gradom), oko kule Minčeta. To su uglavnom debelo slojevite (slojevi debljine od 1,5 m do 3 m) do masivne naslage gromadastih izdanaka.

Pretežito su to mudstoni svijetlosmeđe boje, s rijetkim proslojcima wekstone i pekstona s peloidima, bentosnim foraminiferama i kršjem te cijelim ljušturama rudista. Tek mjestimice se nalaze slojevi s više eolisakusa i taumatoporela, koje su tipični fosili mlađega turona i starijega senona krških Dinarida, pa tako i glavno obilježje naslaga neformalne litostratigrafske jedinice Gornji Humac, kako je izvorno opisana na Braču.

Donja granica ove jedinice nije utvrđena na samome lokalitetu, a gornju granicu obilježava prijelaz u dobro slojevite wekstone i pekstone. Vapnenci ove jedinice su dobro slojeviti (pretežito 20-50 cm), pretežito zrnasti litotipovi s dosta peloida, intraklasta i kršja rudista. Boja im varira od svijetlosmeđe do tamnije smeđe, a u najmlađem dijelu ima i laminiranih i bituminoznih proslojaka u izmjeni. Pored mjestimice brojnih presjeka rudista, u ovim je naslagama utvrđena i bogata mikrofosilna zajednica bentosnih foraminifera, među kojima su stratigrafski najvažnije sitnije keramosferine koje prema klasičnoj stratigrafiji krških Dinarida ukazuju na mlađesantonsku starost (iako su prema najnovijim određivanjima apsolutne starosti te naslage vjerojatno ipak nešto starije, tj. konijačke starosti). Podinu ove jedinice predstavljaju pretežito muljevite naslage jedinice Gornji Humac. Gornja je granica ovih naslaga različita: u istočnim i zapadnim dijelovima istraživanoga terena neposredno na naslagama ove jedinice nalaze tragovi dugotrajne emerzije. Na ovim naslagama su paleogeografskoga udubljenja – manjega korita ispunjenoga vapnencima s pelagičkim utjecajem.

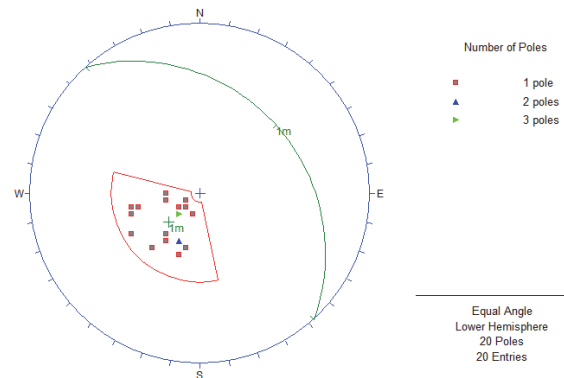
Kršje pomiješano sa zemljom nije izdvajano, no ono postoji u gotovo svim manjim ili većim vrtačama i depresijama. To je uglavnom pokriveno područje vegetacijom, uglavnom su to palme i olianderi. Te naslage sadrže gline i fragmente stijene podloge. Fragmenti osnovne stijene različite su veličine, blokovi mogu biti veličine 50x30 i 40x25 cm.

1.2. Uže tektonsko područje

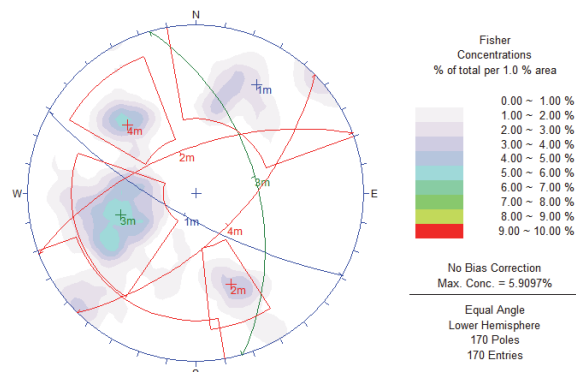
Područje Dubrovnika pripada strukturno-tektonskom dijelu para autohtona, izostaje područje Cukali zone koje je dijelom prekriveno navlakom Visokog krša i samom zonom Visokog krša koja je sjeveroistočno od područja istraživanja. Strukturno-tektonska jedinica koja izgrađuje područje kule Minčete pripada para autohtonu i možemo ju pratiti od juga do sjeveroistoka izvan našeg područja istraživanja. Naslage gornje krede karakterizira različitost litostratigrafskih jedinica. Litostratigrafske jedinice konkordantno u sukcesiji naliježu jedna na drugu od mlađih prema starijim. U predjelu kule prevladavaju diskontinuiteti pod kutom od 15 - 80°. Naslage se nalaze u južnom spušenom krilu sinklinale i u nastavku su u rasjednom kontaktu. Uslijed povijanja strukture zijeve pukotina postaje sve veći, tako da je ovdje zijeve u pravilu preko 5 mm. Ova strukturno-tektonska jedinica je monoklinalne građe, slojevi su isključivo smjera nagiba prema sjeveroistoku, što je i jasno vidljivo na dijagramu slojevitosti (sl. 1). Na dijagramu (sl. 2) gdje su prikazani svi pukotinski sustavi šireg prostora, vidljiva je šira zona rasjeda okomice na os „b“ (crvene linije) čija se vergenca može mijenjati od sjeverozapadne do jugoistočne.

U skladu sa slojevitošću te relativno mirnim i pravilnim slijedom naslaga, strukturni dijagram pukotina i rasjeda pokazuje „očekivanu“ sliku – diskontinuitete dinaridskog pravca pružanja (sjeverozapad-jugoistok) sjeveroistočne vergencije (plava boja) (sl. 2).

Važno obilježje strukturno-tektonskoj jedinici daje i rasjed dinaridskog pravca pružanja (sjeverozapad-jugoistok) koji prolazi ispod kule Minčeta na istočnom dijelu istraživanog terena. Na sjecištima tog rasjeda i usjeka ceste vidljive su mikro bore (sl. 3), zalijeganje slojeva i pukotina te rasjedna rastrošena zona. Dio te rasjedne zone je zaštićen (plombiran), Miklin et al. (2015).



Slika 1. Dijagram trasa ravnina strukturno-tektonске jedinice dubrovački para-autohton.



Slika 2. Dijagram trasa ravnina pukotina i rasjeda dubrovačke strukturno-tektonске jedinice, slojni diskontinuiteti - zeleno, osna ravnina - plavo, okomito na os „b“ crveno.

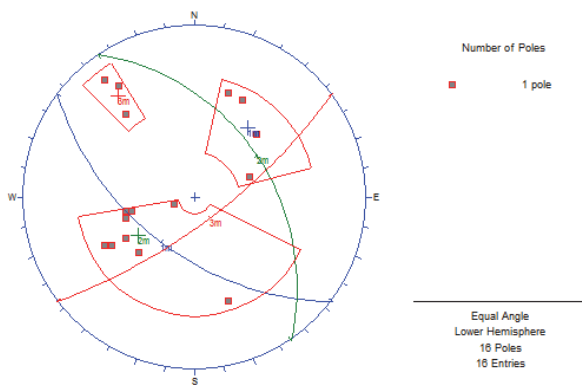
2. PROGRAM ISTRAŽIVANJA

Istražni radovi bazirali su se na inženjerskogeološkom kartiranju temelja tvrđave i zidina, a sva oštećenja su geodetski zabilježena i prikazana na karti mjerila M 1:250.

Nevidljiva oštećenja u temeljima i u zidu, kao i njihovo prostiranje, pokušalo se otkriti geofizičkim metodama, Šumanovac (2008). Od metoda istraživanja korišteno je georadarsko (GPR – ground penetrating radar) profiliranje, električna istraživanja primjenom geoelektrične tomografije (ERT - electrical resistivity tomography), a od seizmičkih istraživanja korištena je višekanalna analiza površinskih valova (MASW), kao i posebna prilagodba "downhole" seizmičkog mjerenja na pokosu obloženog usjeka.



Slika 3. Antiklinala u usjeku Ulice Iza Grada.



Slika 4. Kumulativni dijagram trasa ravnina pukotina i rasjeda mjereno u zoni Kule Minčeta jedinice, slojni diskontinuiteti - zeleno, osna ravnina - plavo, okomito na os „b“ crveno.

2.1. Inženjerskogeološko kartiranje

Osnovnu značajku stijenske mase baziramo na mjerenju parametara diskontinuiteta u stijeni, [ISRM \(1978\)](#). Mjerenja koja smo izvršili u kombinaciji s geofizičkim mjerenjima dostatna su za kvalitetno projektiranje sanacije objekta. Diskontinuiteti u stijenama nikad nisu ravnomjerno distribuirani u svim smjerovima, već se obično pojavljuju u setovima. Izdvojili smo tri osnovna seta diskontinuiteta, a na nekim mjestima mogli smo mjeriti još jedan ili najviše dva seta kao ostale diskontinuitete. Vrijednost linearne učestalosti ovisila je o smjeru linije kroz stijensku masu. Na otvorenim izdancima mjerili smo tlačne čvrstoće Schmidovim čekićem po preporuci internacionalnog društva za mehaniku stijena ([ISRM 1978](#)). Mjeren je RQD indeks, razmak diskontinuiteta, zijev, hrapavost i rastrošenost stijenke, ispunjena diskontinuiteta i to su bili ulazni podaci za klasifikaciju stijenske mase.

Temelji Tvrđave Minčeta većim dijelom su položeni na stijensku podlogu, dio zida temeljen je u rasjednoj zoni koja se sastoji od fragmenata osnovne stijene, većih i manjih blokova, prahovitog materijala i veoma malo gline. Podno tvrđave Minčeta iskopana je cesta (Ulica Iza Grada). Iskopom je došlo do relaksacije naprežanja u stijenskoj masi. Relaksacija se očituje otvaranjem zjapećih

pukotina ne samo u osnovnoj stijeni već i na zidovima Kule.

Stratigrafski to su gornjo kredni vapnenci, a uz rasjed su tektonske breče, kao što je spomenuto u geološkom dijelu. U normalnom slijedu su mikritni do mikritno - zrnasti vapnenci sive do boje bijele kave, varijabilne debljine pojedinih slojeva su između 20 i 45 cm. Slojevi su nagnuti prema sjeveroistoku i istoku od 43-60°, a najučestaliji su im položaji 63/60 i 80/43.

Između temelja Kule i Ulice Iza Grada, registrirano je nekoliko područja koja su prekrivena prašinastom glinom kršjem ili odlomcima kršja te blokovima vapnenaca. Ovo je područje zasađeno olianderima i palmama.

Registrirani rasjed vidljiv je u usjeku prokopane ulice. Unutar vapnenačke serije, rasjed je dijagonalni na smjer osi ulice, a dijelom je i ispod Kule Minčete. Nestabilnosti u zoni rasjeda sanirane su kamenom oblogom (plombom). Kamena obloga – zid načinjen je tako da je omogućeno dreniranje podzemne vode u zaleđu obloge – zida (na zidu su vidljivi tragovi vode). Površinskih vodnih pojava nema. Ulazni podaci za GSI klasifikaciju stijenske podloge, odnosno značajke registriranih diskontinuiteta osnovnog strukturnog sklopa prikazane su u **tablici 1**.

Inženjerskogeološkim kartiranjem dobivena je inženjerskogeološka karta (**sl. 5**), a kategorizacijom stijene utvrđene su 3 kategorije stijene:

Trošna stijena podloge. Zona širine do 2.5 m, vapnenci umjereni do jako trošni (MW – HW), širokog zijeva pukotina od 1-5 mm, bez ispune, okršeni, RQD do 70 %, a GSI u rasponu od 51-52.

Stijena podloge. Vapnenac je srednje trošna (MW), zijev pukotina 0.1 – 1.0 i 1.0 – 5.0 mm, ispunjena je glinovita, s kalcitom ili bez. Moguća je pojava kaverni u zoni rasjeda te povremeno procjeđivanje vode u rasjednoj zoni. RQD = 80 %, osim u rasjednoj zoni. GSI = 56-66.

Rasjedna zona. Zona je širine 4-5 m, sastoji se od kršja vapnenaca i vapnenaca, jako trošna zona (HW), više od pola materijala stijene je raspadnuto, zijev pukotina je > 5 mm. Pukotine su zaglinjene ili ispunjene sitnim fragmentima osnovne stijene, te bez ispune. Moguće su kaverne. Ova zona lako prihvaća (navlači), ali i otpušta vodu. RQD = 20 %, GSI = 37.

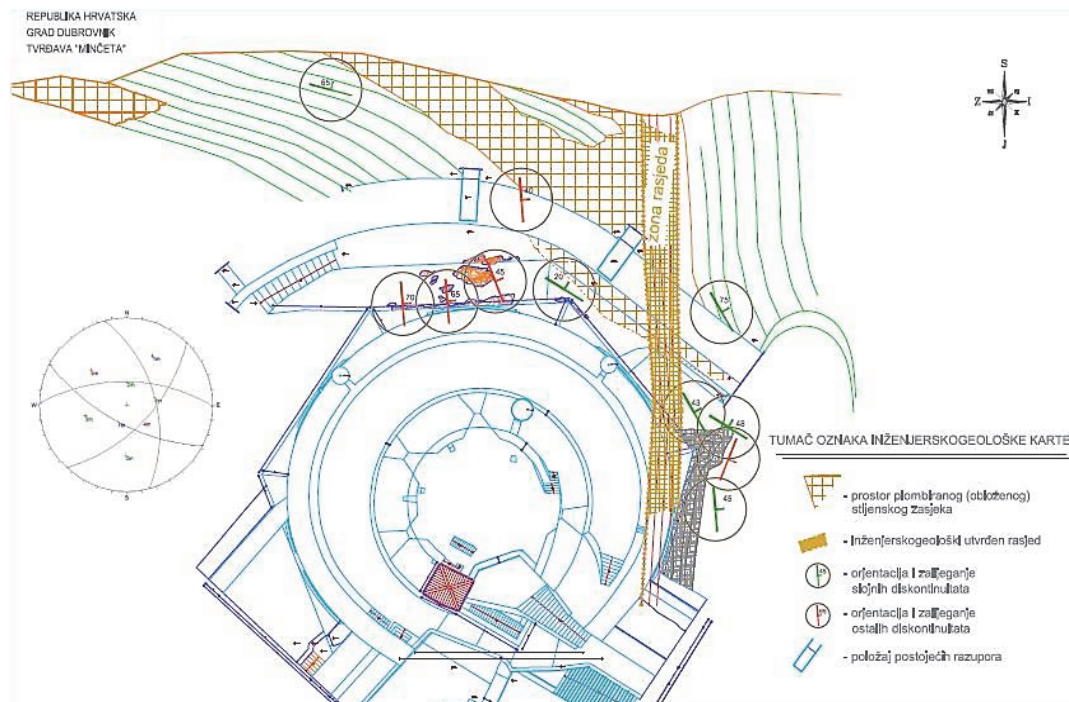
3. OPIS METODA

3.1. Geoelektrična tomografija (ERT - electrical resistivity tomography)

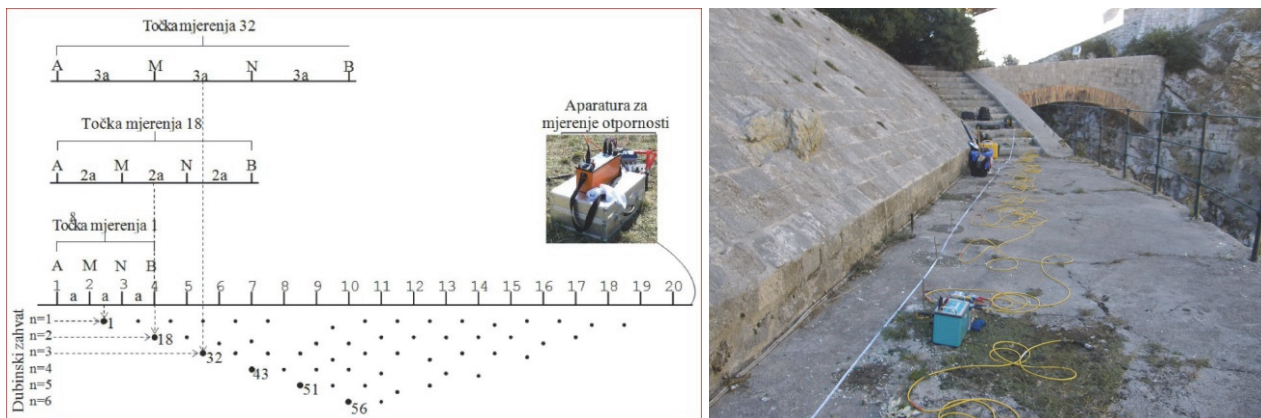
Po samom vrhu sjevernog i sjeveroistočnog zida kule Minčeta u Wennerovom mjernom rasporedu postavile su se 24 elektrode u ravnoj liniji profila (**sl. 6**). Preklopnik geoelektričnog uređaja za mjerenje automatizirano prebacuje raspored strujnih (AB) i potencijalnih (MN) elektroda. Mjeri se jakost struje između strujnih elektroda pa se iz razlike potencijala između potencijalnih elektroda, pomoću konstante geometrijskih odnosa elektroda (za Wenner PRF – $K=2\pi CC/3$), određuje prividna otpornost. Interpretacijom se određuju debljine i specifični električni otpor pojedinih geoelektričnih sredina. Polovište elektroda A i B nalazi se na udaljenosti X od početka geoelektričnog profila. Pri mjerenju udaljenost elektroda iznosi trećinu udaljenosti AB.

Tablica 1. Vrijednosti (bodovi) geološkog indeksa čvrstoće, GSI za stijenu podloge, trošnu stijenu podloge i za rasjednu zonu (izračunato prema Hoeku; GSI = RMR89 – 5).

Kula Minčeta	Stijena podloge			Trošna podloga	Rasjedna zona
	SS1,2	OR	OB		
JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA	9	7-8	7-8	6	6
INDEKS KVALITETE JEZGRE (RQD)	16	14-16	15	14	5
RAZMAK DISKONTINUITETA	8-11	8-11	7-8	7-8	6
STANJE PODZEMNE VODE	15	15	15	15	15
UKUPNO STANJE STIJEJSKE MASE	48-51	44-50	44-46	42-43	32
STANJE DISKONTINUITETA					
DUŽINA DISKONTINUITETA	4	6	6	4	6
ZIJEV	0	1	1	0	0
HRPAVOST	3	3	3	3	1
ISPUNA	6	6	4	4	2
RASTROŠENOST	3-5	3-5	3-5	3	1
UKUPNO STANJE DISKONTINUITETA	16-18	19-21	17-19	14	10
SVEUKUPNO	64-69	63-71	61-65	56-57	42
Za GSI	-5	-5	-5	-5	-5
GSI	59-64	58-66	56-60	51-52	37



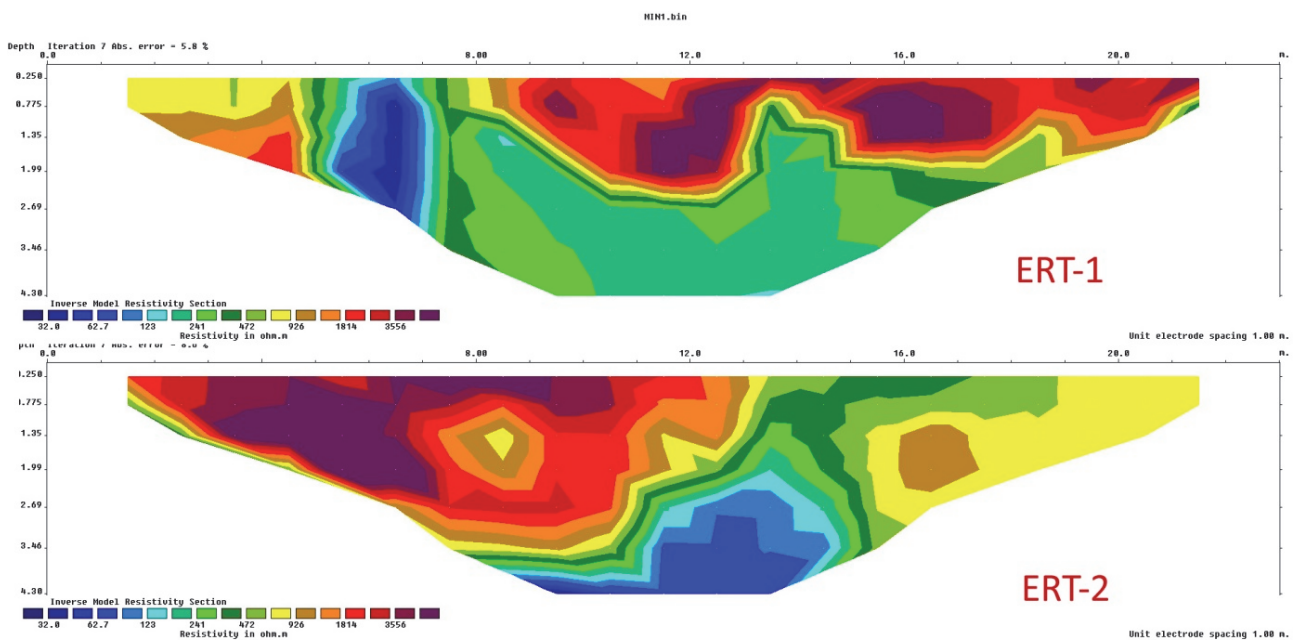
Slika 5. Inženjerskogeološka karta tvrđave „Minčeta“.



Slika 6. Profil geoelektrične tomografije - Wennerov mjerni raspored.

Tablica 2. Kategorije tla prema električnim otpornostima za Tvrđavu Minčeta, Dubrovnik.

ELEKTRIČNA OTPORNOST	KLASIFIKACIJA TLA		
< 150 Ω m	<u>zavodnjeni dio stijenske mase</u> (<u>rasjedna zona</u>)		
250 - 1800 Ω m	<u>stijena podloge</u> (manja otpornost > veća trošnost)		
> 1800 Ω m	<u>dezintegrirana, okršena stijena podloge</u>		



Slika 7. Rezultati geoelektrične tomografije u profilu ERT-1 i ERT-2.
Izmjerene otpornosti na profilu nalaze se u rasponu od 32 Ω do 10 000 Ω m.

Prednosti geoelektričnog profiliranja (geoelektrična tomografija):

- nije potrebno razmicanje elektroda sukladno položaju u profilu,
- mjerni raspored se u profilu pozicionira automatizirano.

Interpretirani rezultati prikazuju se kao grafički prikaz profila otpornosti po dubini. Profil se može prikazati u boji ili u crno-bijelome prikazu, gdje različite šrafure prema legendi prikazuju zone različitih otpornosti. Trapezni oblik grafičkog prikaza, jer se s udaljenošću od središta profila smanjuje dubina interpretacije, posljedica je postepenog smanjivanja mjernih podataka kako se razmak strujnih i potencijalnih elektroda povećava. Ako su potrebni i podaci s krajeva profila, kompletan profil se može preseliti duž linije istraživanja, te se grafički prikazi nastavljaju jedan na drugi. Geoelektrična tomografija sve se više koristi kao metoda za istraživanje zona sa složenom geologijom gdje metoda vertikalnog geoelektričnog sondiranja (VES), kao i druge geofizičke metode ne daju dovoljno kvalitetne rezultate.

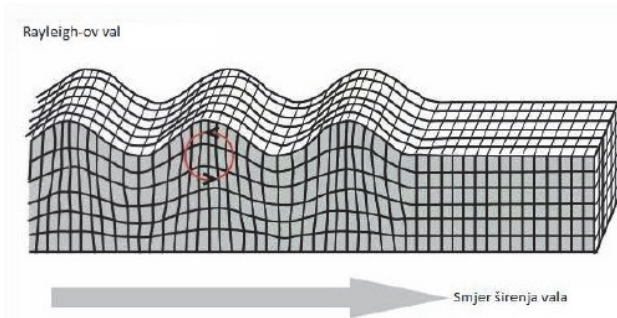
Inženjerskogeološke sredine interpretirane su na geoelektričnim profilima ERT-1 i ERT-2 (sl. 7). Koristila se geoelektrična tomografija u dvodimenzionalnom (2D) prostoru. Metoda daje dobre rezultate u krškim terenima, prema Novoselu (1980), klasificirana je karbonatna stijena.

3.2. Seizmička istraživanja

3.2.1. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)

Višekanalna analiza površinskih valova (MASW - Multi-Channel Analysis of Surface Waves) omogućava određivanje brzine posmičnih valova podpovršinskih materijala. Pri utvrđivanju dinamičkih svojstava tla (V_s , $V_{s,30}$), korištena je MASW metoda. Seizmički valovi se u beskonačnom, homogenom i izotropnom mediju šire kao P i S prostorni valovi. S približavanjem granici polu-beskonačnog prostora ti se valovi transformiraju u površinske valove. Za generiranje seizmičkih valova na površini koristili smo vertikalni izvor - pad utega (drop-weight), koji

generiraju površinske Rayleighove (R) valove koji u najvećoj mjeri preuzimaju seizmičku energiju izvora (R valovi: 67%; S valovi: 26%; P valovi: 7%).



Slika 8. Širenje Rayleighovog vala.

Složeni oblik Rayleighovih valova sastoji se od longitudinalnog i transverzalnog gibanja s međusobnim pomakom u fazi. Materijalna čestica prelazi eliptičku putanju kojoj je velika poluos vertikalna kada je val blizu površine. R valovi često se nazivaju i valjanje tla (eng. ground roll, sl. 8.). Najvažnije svojstvo R valova je frekventna disperzija. Valovi niže frekvencije, pa prema tome veće valne duljine, šire se dublje u medij nego valovi visoke frekvencije, odnosno male valne duljine. Brzina širenja vala pri pojedinoj frekvenciji naziva se fazna brzina, a krivulja koja prikazuje faznu brzinu u ovisnosti o frekvenciji naziva se krivulja fazne brzine ili disperzijska krivulja. Prostorni P i S valovi nemaju disperzivno svojstvo. Pojava više faznih brzina na određenoj frekvenciji naziva se višesmodalna disperzija. U ovom slučaju najsporiji mod naziva se osnovni (M0), a sljedeći s većom brzinom prvi viši mod (M1), itd. Fazna brzina širenja Rayleighovih valova (V_r) prvenstveno ovisi o brzini posmičnih valova (V_s). Izraz koji pokazuje

odnos između brzine posmičnih valova (V_s) i brzine Rayleighovih valova (V_r) je sljedeći:

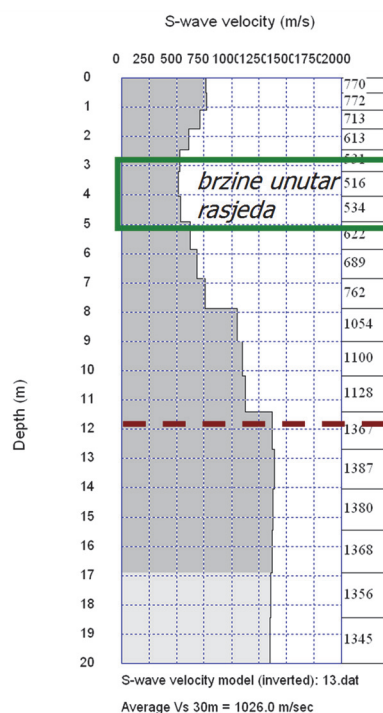
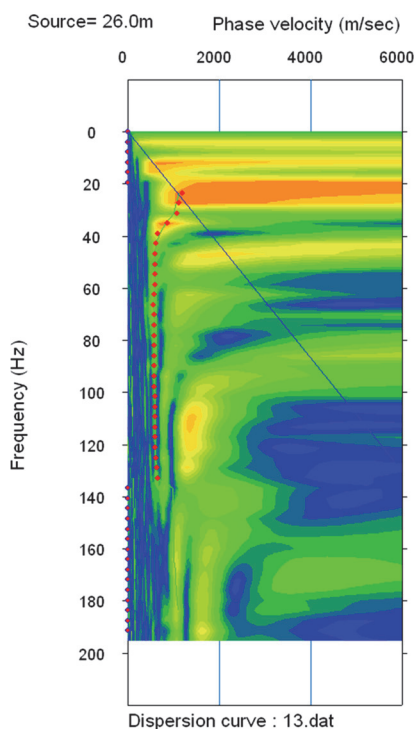
$$V_s = P V_r,$$

gdje je P konstanta ovisna o Poissonovom koeficijentu (ν) (primjerice $P = 1.09$ za $\nu = 0.25$).

3.2.2. "Downhole" seizmičko mjerenje na pokosu obloženog usjeka.

"Downhole" je tehnika kod koje se izvor vala nalazi na površini, a osjetilo oscilacija (geofon) u bušotini. Cilj je precizno izmjeriti vrijeme potrebno da valovi P ili S prijeđu put od izvora na površini do geofona, a brzina se potom dobije kao kvocijent poznatog puta s izmjerenim vremenom. Mjerenja se uobičajeno izvode intervalnim pomicanjem geofona od dna prema ušću bušotine.

Ova metoda je za potrebe istraživanja modificirana tako da smo pokos zidina (zapravo obloženi usjek) tretirali kao bušotinu, a geofon smo pomicali po rubu pokosa do dna usjeka. Prilikom mjerenja na ovaj način geofon mora biti čvrsto priljubljen uz stjenku zida pokosa. Kako bi prilagodili sustav za mjerenje načinjene su „sanjke“ koje su klizile po pokosu, dodatno su bile opterećene vrećama pijeska da bi se postiglo što bolje pritanjanje uz stjenku pokosa. Prednost ove metode je u mogućnosti dobivanja intervalnih brzina u relativno tankim proslojcima u odnosu na refrakcijsku seizmiku (sl. 11. i sl. 12.). Druga prednost je što se može uočiti inverzni raspored seizmičkih brzina s dubinom ($V_1 > V_2$). Programiranjem intervala ispitivanja mogu se direktno utvrditi tzv. slijepe zone, a posredno se može provjeriti i rezultate refrakcijskih istraživanja.



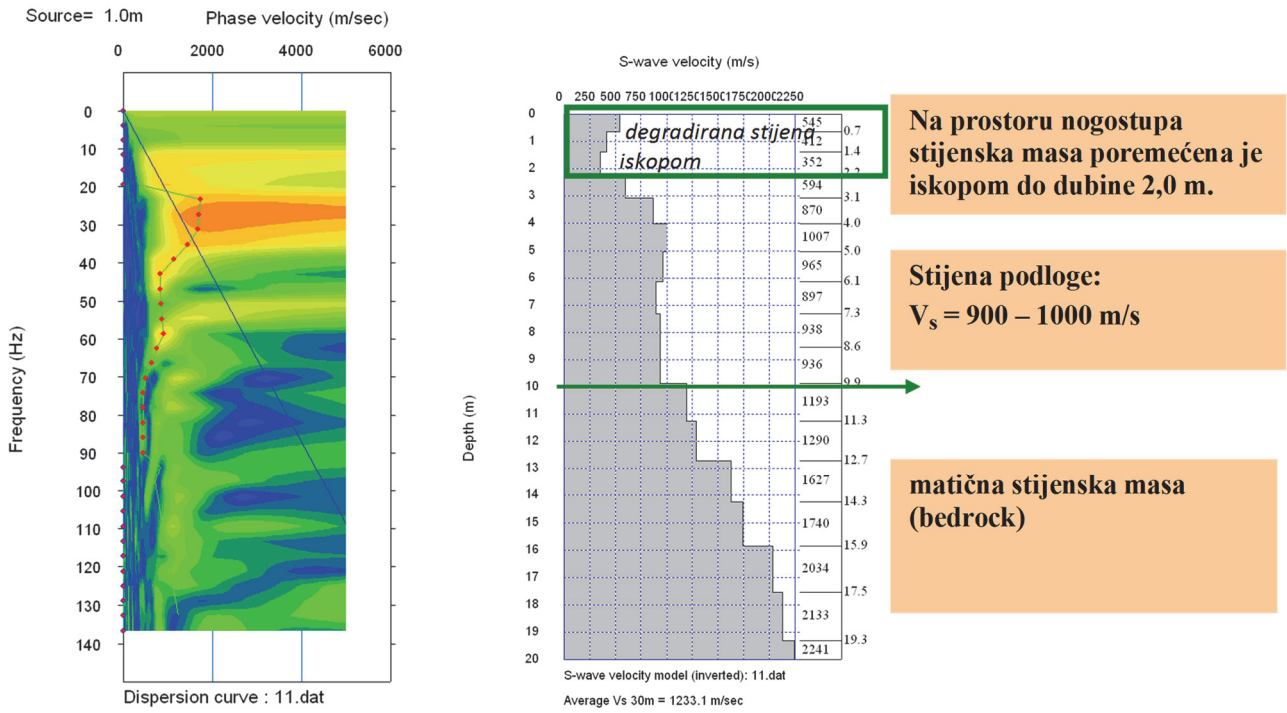
Rasip seizmičkih brzina posmičnih valova u širokim je granicama na prostoru temeljne stijene usjeka.

$V_s = 500 - 1100$ m/s

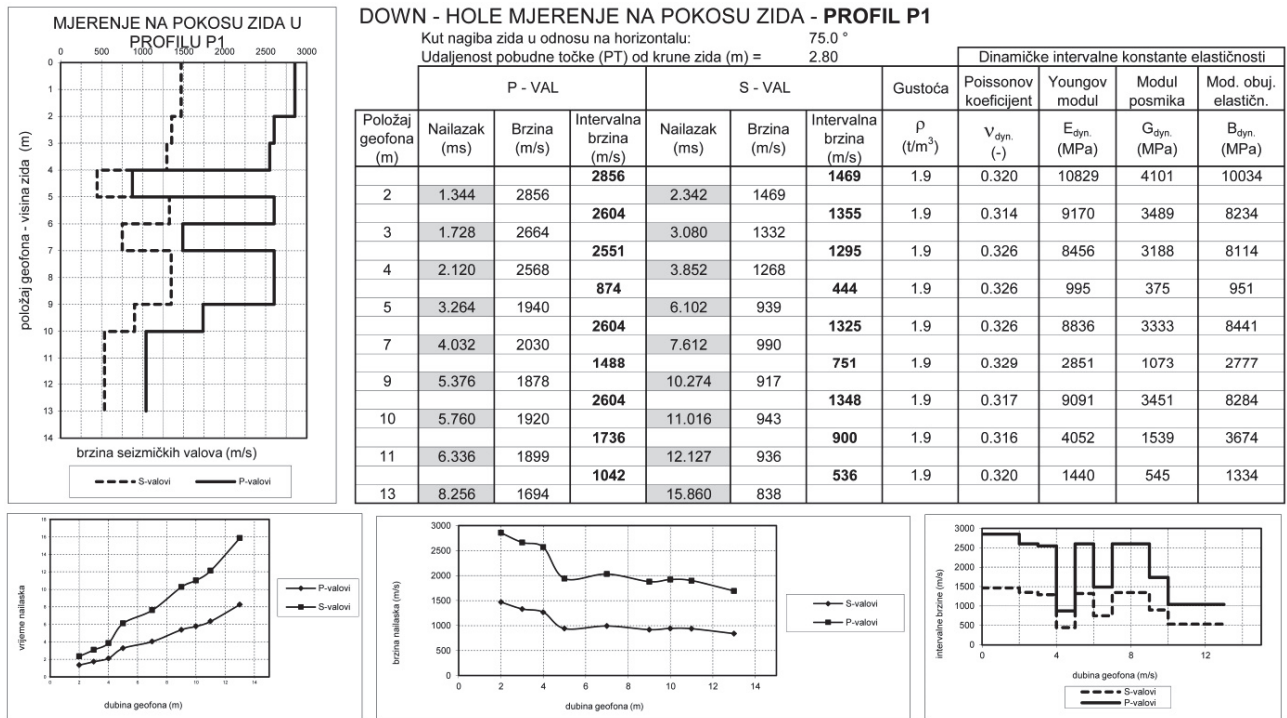
- na dispozitivu profila utvrđeno je rasjedanje stjenke mase

dubina usjeka $h = 12,0$ m (stijenska masa dublje od kote usjecanja ujednačenih je karakteristika)

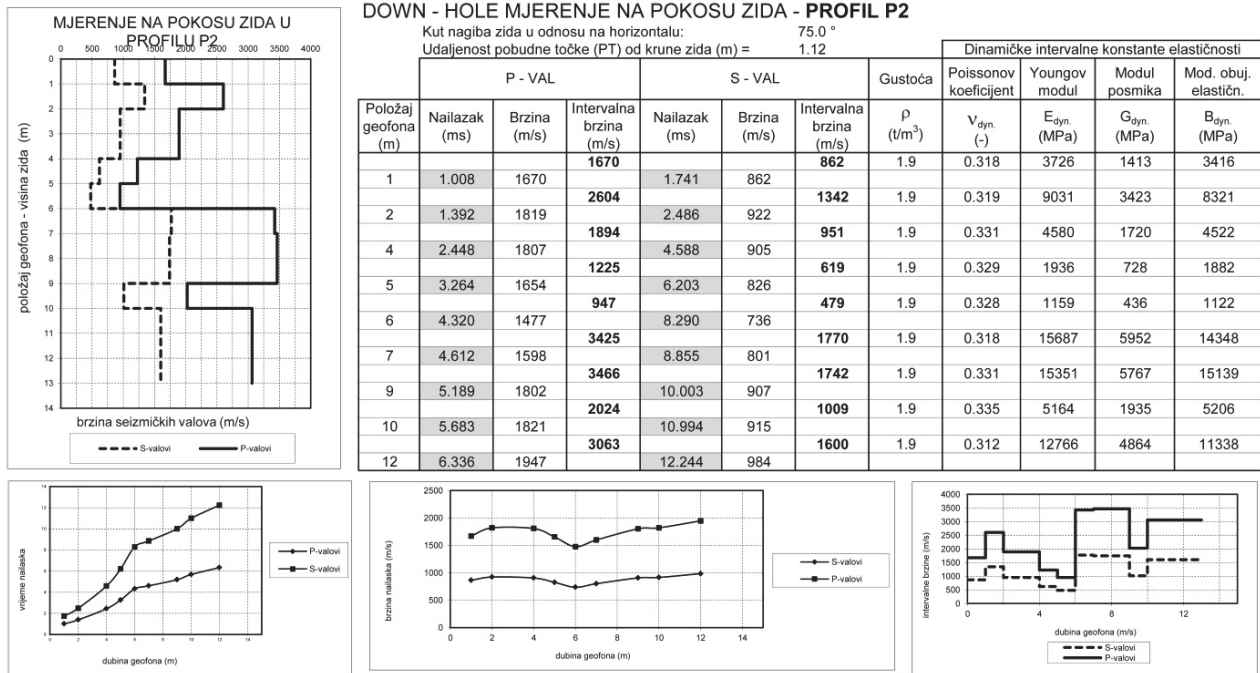
Slika 9. MASW – 2, interpretacija snimljenih seizmičkih profila.



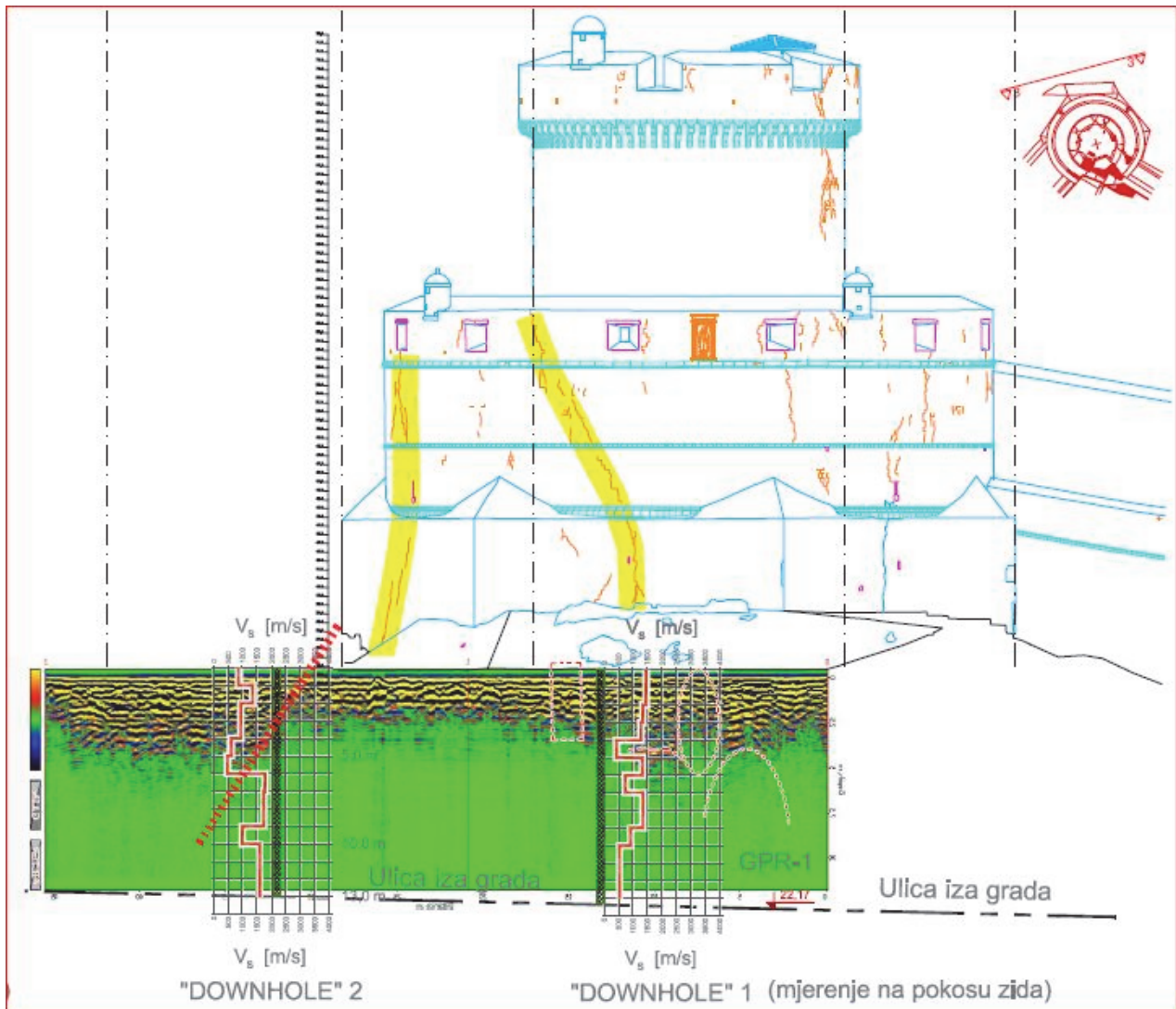
Slika 10. MASW - 3 Interpretacija snimljenih seizmičkih profila.



Slika 11. Rezultati brzina V_P i V_S seizmičkih valova iz "downhole" snimaka na pokosu usjeka-profil P1.



Slika 12. Rezultati brzina V_P i V_S seizmičkih valova iz "downhole" snimaka na pokosu usjeka-profil P2.



Slika 13. Prikaz geofizičkih profila Downhole 1 i Downhole 2 preko GPR radiograma.

4. ZAKLJUČAK

Provedena je geotehnička karakterizacija temeljne stijenske mase na kojoj se temelji Tvrđava Minčeta. Osnovna stijena je inženjerskogeološki kartirana, a fizikalno-mehanička svojstva izdvojenih jedinica određena su geofizičkim istraživanjima. Rezultati geofizičkih istraživanja preklapljeni su na kompozitnim geofizičkim profilima radi detaljne interpretacije utvrđenih anomalija temeljne stijene.

Raspored istraživanja ostvaren je postavljanjem geofizičkih profila na dostupnim platoima neposredno uz temelje kule (kota +35,44), seizmičkim mjerenjima na zidu usjeka uz ulicu „Iza Grada“ te konačno u razini same ulice na koti +22,80.

Rezultati geofizičkih istraživanja ukazali su na dvije zone s identificiranim anomalijama. Prva zona poklapa se sa inženjerskogeološki determiniranom rasjednom zonom, dok druga zona otkriva značajnije pukotine i kavernozone forme na prostoru prve razupore. Za izrađene kompozitne geofizičke profile vidljiva je dosljednost geofizičkih rezultata različitih metoda u identifikaciji anomalija, koje se poklapaju s inženjerskogeološkim elementima. Na navedenim profilima (sl. 13), posebno su istaknuta oštećenja u formi grupe pukotina prethodno geodetski snimljenih na samoj tvrđavi. Smjer pukotina položajno odgovara prostorima utvrđenih anomalija u temeljnom tlu.

Kvaliteta stijenske mase unutar rasjeda bitno je lošijih mehaničkih karakteristika u odnosu na neoštećenu stijenu podloge. U gornjoj zoni trošenja prisutno je jače okršavanje te se mogu očekivati i široke pukotine i kavernozone forme. Najjače dezintegrirana stijenska masa je uz rasjedni kontakt, koji je dijagonalni na smjer obilazne ulice (Ulica pod gradom), oko kule Minčeta.

Iskopom usjeka za potrebe izgradnje ulice „Iza Grada“ došlo je do preraspodjele prirodnih naprezanja u stijenskoj masi koja su prouzročila pomake na geološki najslabijem elementu, prisutnom rasjedu u sklopu utvrđene sinklinale. Ostvareni pomaci dovoljnih su iznosa da prouzroče oštećenja na građevini. Graditelji tog vremena uvidjeli su posljedice, te su problem rješavali izgradnjom razupora. Problem predisponiranih stijenskih diskontinuiteta je i vremensko trošenje unutar rasjeda uzrokovano radom vode. Na obje geofizički utvrđene anomalije zabilježena je prisutnost vode (plave nijanse boje na električnim profilima), također vizualno utvrđena na pokosu zida.

Rasjedna zona saturirana je vodom, u toj zoni postoji trošenje i ispiranje, a navedeni proces dovoljno je progresivan tako da za niz godina dolazi do mehaničke destabilizacije, te se pojavljuju pukotine na objektu, a postojeće se proširuju.

Važno obilježje daje rasjed pružanja (sjever-jug) koji prolazi ispod kule Minčeta na istočnom dijelu kule. Na sječistima tog rasjeda i usjeka ceste vidljive su mikro bore, zalijeganje slojeva i pukotina, te rasjedna rastrošena zona. Dio rasjedne zone na zidu usjeka je zaštićen (plombiran) i sam kontakt nije vidljiv. Temeljem dobivenih ulaznih parametara (GSI klasifikacija) za trošnu stijenu, stijenu podloge i rasjednu zonu može se zaključiti da dvije kategorije pripadaju povoljnoj stijenskoj masi, a stijena u rasjednoj zoni pripada slaboj kategoriji.

Na temelju prikupljenih i statistički obrađenih podataka može se zaključiti da globalna stabilnost temelja Kule Minčeta može biti upitna u slučaju djelovanja potresa, što treba računski provjeriti, Novosel et al. (1980). Naime, potrebno je provjeriti stabilnost temeljene stijene za slučaj potresa, uz moguću pojavu klizne plohe koja se pruža od ruba ceste do unutrašnjeg hodnika u najdonjoj etaži tvrđave. Postojeća rasjedna zona u širini od 4-5 m već je prilikom građenja kule bila okarakterizirana kao slaba, jer je posebno ograđena i zaštićena kamenim blokovima, a statički je poduprta kontraforima koji su razuprli usjek (Ulica Iza Grada). Upitno je da li su ove razupore dovoljne za preuzimanje sila od bočnog potiska stijenske mase ispod temelja tvrđave u slučaju potresa. Tvrđnju je potrebno računski provjeriti. Područje rasjedne zone s vremenom prihvaća vodu s površine i otpušta vodu duž rasjeda, što je vidljivo i na slikama – procjeđivanje vode u usjeku ulice (sl. 14). Voda ispire glinovitu ispunu i sitnije fragmente uz rasjed, te s vremenom dolazi do slijeganja terena što se reflektira i na zid tvrđave.

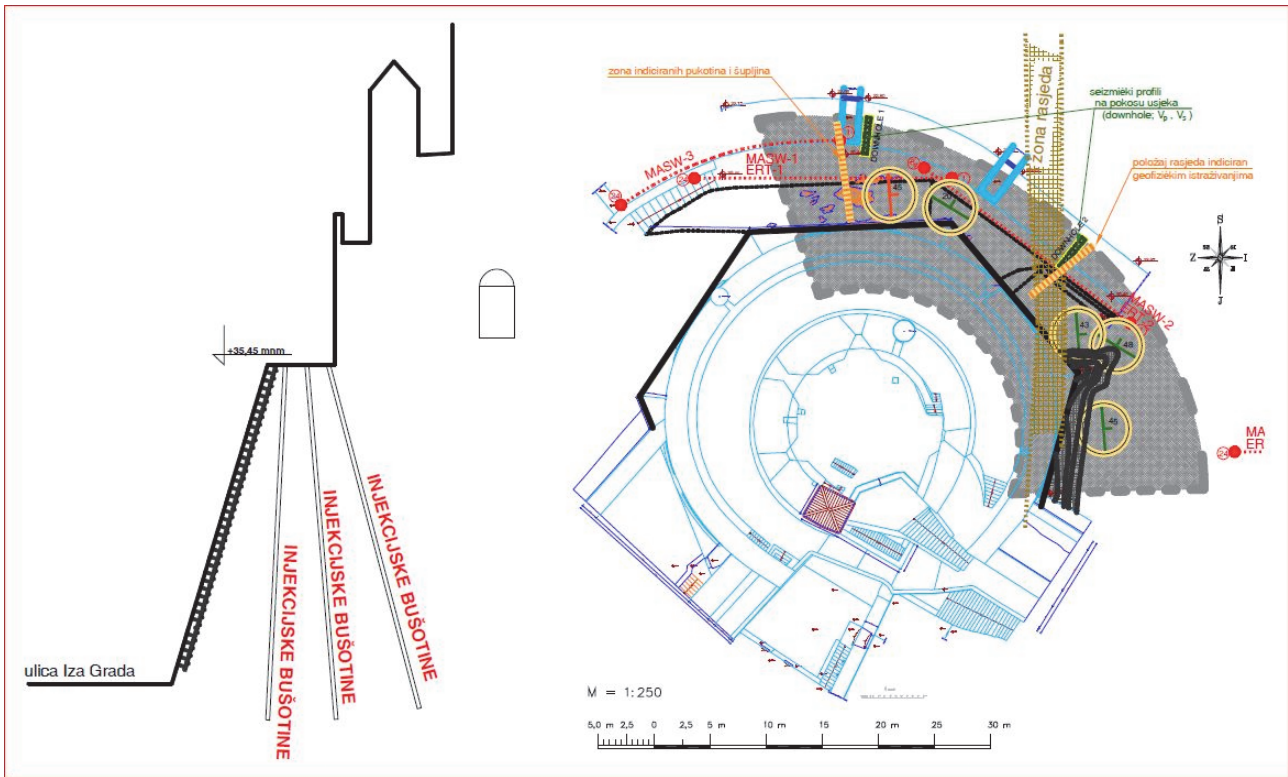


Slika 14. Procjeđivanje vode po pokosu zidina kule Minčeta.

4.1. Preporuke za sanaciju

Preporučuje se injektiranje rasjedne zone kako bi se zaštitila građevina tvrđave od daljnje degradacije. Za sanaciju preporučuje se višeredno injektiranje u "cik-cak" rasporedu. Položaj injekcijske zavjese trebao bi biti okomit na smjer rasjeda (uz sam zid kule) dubine barem 1 m ispod kote Ulice Iza Grada (+22,00). Injektiranje treba provesti vertikalno s platoa +35,44 uz same zidove tvrđave, s bušotinama u tri reda te inklinacijama (sl. 15). Područje koje je potrebno sanirati osjenčano je na situacijskom planu

(sl. 15). Predložena sanacijska mjera odnosi se prvenstveno na sprječavanje daljnje degradacije stijenske mase zbog utjecaja atmosferilija. Problematika stabilnosti i sigurnosti stijenske mase pri djelovanju potresa nije predmet ovog istraživanja.



Slika 15. Profil Tvrđave Minčeta i prijedlog inklinacije injeckijskih bušotina i položajna skica s područjem nestabilnog dijela temelja (sivo).

5. Literatura

ISRM (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on standardization of laboratory and field tests. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., vol 15, 319-368. Pergamon Press Ltd. London.

MIKLIN, Ž., S., STRELEC, K., GRABAR, T., NOVOSEL, (2015): Sanacija tvrđave „Minčeta“ Rehabilitation of the fortress “Minčeta”. 5. hrvatski geološki kongres s međunarodnim sudjelovanjem. Knjiga sažetaka – Abstract Book. 175-176. Osijek 23-25. rujna 2015. Hrvatska

NOVOSEL, T., TUŠAR, Z., MULABDIĆ M., GARAŠIĆ, M., KORAŽOJA, S. (1980): Ocjena stabilnosti kosina u zasjecima (usjecima) građenih od karbonatnih stijena. Saopćenja 5. simpozija Jugoslavenskog društva za mehaniku stijena i podzemne radove, Split, Knjiga 1, (185-192).

STRELEC, S., MIKLIN, Ž., GRABAR, K., ŠPIRANEC, M., PAŽUR, I. (2013): Izvješće o provedenim geotehničkim i geofizičkim istraživanjima temeljnog tla tvrđave "Minčeta" u Dubrovniku. 29 str., 8 priloga, 19 slika, 7 tablica. SPP d.o.o. Trstenjakova 3, Varaždin.

F. ŠUMANOVAC (2008): Geofizička istraživanja podzemnih voda. Sveučilišni udžbenik. Zagreb 2007.

PRIMJERI UPORABE ŠLJUNČANIH PILOTA ZA UBRZANJE KONSOLIDACIJE I OJAČANJE TLA

REVIEWS OF STONE COLUMNS APPLICATION FOR CONSOLIDATION ACCELERATION AND SOIL IMPROVEMENT

Vitković Valentino ^{1*}, Ivandić Krešo ¹

² Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za geotehniku, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

*Elektronska adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: valentino.vitkovic@gmail.com

Sažetak: Primjena šljunčanih pilota je u zadnjih dvadesetak godina u RH doživjela snažnu ekspanziju. Ona se ponajviše veže za snažni uzlet infrastrukturnih radova početkom ovog stoljeća. Pokazuje se da je primjena tehnologije sanacije temeljnog tla uporabom šljunčanih stupnjaka nezaobilazan segment pri rješavanju različitih zadataka u problemima u području geotehničkog inženjerstva. Moguća je uporaba u različitim vrstama tla i uslojenosti. Ponajviše riječ je o slabo propusnim sitnozrnim materijalima velike stišljivosti, iako je moguća promjena i u krupnozrnim tlima. U radu se prikazuju određena uspješno primijenjena rješenja konkretnih inženjerskih zadataka. Daju se preporuke za daljnje inženjerske aktivnosti u cilju daljnjeg unapređenja opisanih postupaka i tehnologije.
Ključne riječi: šljunčani piloti, slijeganje, konsolidacija, poboljšanje tla.

Abstract: Application of stone columns technology in the last twenty years in Croatia has experienced strong expansion. It is mainly linked to the momentum of infrastructure works at the beginning of this century. Indeed the application of remediation of the ground using stone columns is unavoidable segment in solving various tasks in the problems in the field of geotechnical engineering. It is possible to use in different types of soil and layering. Above all this is the low permeability of fine-grained materials, high compressibility, although it is possible to use and in coarse soils. The paper presents certain successfully applied solutions to real engineering tasks. Recommendations are made for further engineering activities in order to further improve the described procedures and technology.

Keywords: stone columns, settlement, consolidation, soil improvement.

Received: 16.11.2016 / Accepted: 03.12.2016

Published online: 14.12.2016

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Konsolidacija tla, odnosno vremenski tok njegova slijeganja, funkcija je više čimbenika. Slijeganje tla se, osim dominantno u vertikalnom, odvija i u preostala dva, horizontalna smjera. Prirodno tlo je generalno heterogeno i anizotropno u svim smjerovima, s međusobno različitim vrijednostima parametara deformabilnosti. U cilju iznalaženja rješenja zadatke procjene vrijednosti slijeganja, uvode se određene pretpostavke i pojednostavljenja realnog ponašanja kontinuuma tla. Analitičko rješenje vremenskog toka slijeganja tla u jednom smjeru dao je *Karl Terzaghi*. Slijeganje sitnozrnih vrsta tla se odvija u dužem vremenskom razdoblju. Pri rješavanju različitih vrsta inženjerskih problema nužno je poznavati vrijednosti slijeganja, neovisno o tome u kojem trenutku se ona ostvaruju. Upravo će vrijednosti slijeganja diktirati relevantnost određenog tehničkog rješenja. U određenim inženjerskim zadacima ostvarenje predviđenih slijeganja tla traje neprihvatljivo dugo vremensko razdoblje. U takvim slučajevima potrebno je ubrzati spomenuti proces vremenskog slijeganja, odnosno konsolidacije tla. Ono se provodi ugradnjom drenažnog sustava u tlu i pred opterećenjem predmetne površine. Dreniranjem se skraćuje put vodi u tlu, što dovodi do skraćenja vremenskog procesa slijeganja tla.

Osnovne proračunske elemente analize postupaka analitičkog proračuna šljunčanih pilota dao je *Priebe, H. J.* Generalno, u ovisnosti o odgovarajućim svojstvima tla, te tlocrtnom rasporedu, dubini i promjeru šljunčanog stupnjaka, određuje se tzv. *Faktor poboljšanja temeljnog tla*. Pri početnim segmentima određivanja projektnih rješenja vrijednost spomenutog faktora kreće se u granicama 2 – 4.

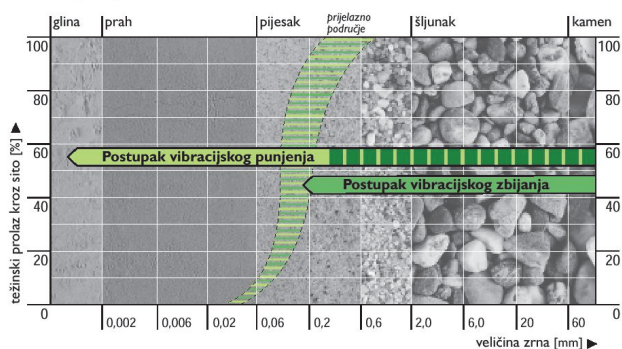
Izvedba, a posljedično i postupci projektiranja, prikazanih primjera uspješnih primjena tehnologije ugradnje šljunčanih pilota – stupnjaka u tlo odvijali su se prije nastupanja nove, trenutno važeće tehničke regulative (*EN 14731:2005, Execution of special geotechnical works – Ground treatment by deep vibration; HRN EN 1997-1:2012/NA; HRN EN 1997-1:2012; HRN EN 1997-2:2012*). Provedena je formalna provjera proračunskih obrazaca i postupaka projektiranja prema novim propisima. Rezultati spomenutih provedenih kontrolnih proračuna potvrđuju da je ispunjen zahtjev o propisanoj, odnosno, usvojenoj margini sigurnosti prema važećoj tehničkoj regulativi.

2. TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA ŠLJUNČANIH PILOTA

Šljunčani piloti je metoda poboljšanja tla kojom se osigurava ubrzanje slijeganja i povećanje parametara deformabilnosti tla ponajviše slabo propusnih, sitnozrnih vrsta tla. Smanjuje se put dreniranja kroz ove slojeve i ubrzo konsolidacija tla. Redovito, u praksi se izvodi nasip za ostvarenje pred opterećenja. Na taj način se provodi ubrzanje konsolidacije za vrijednosti dodatnih naprezanja iznad onih, koja će se ostvariti izgradnjom planiranog zahvata.

Tehnologija izvedbe, odnosno ugradnje šljunčanih pilota, u najvećoj mjeri ovisi o granulometrijskom sastavu tla koje se želi poboljšati (Slika 1). Generalno šljunčani piloti, u ovisnosti o vrsti tla, imaju dvostruke učinke poboljšanja. Kod slabo propusnih i jače stišljivih vrsta tla, kao što su glinoviti i prašnasti materijali, te njihove mješavine, poboljšanje se primarno ostvaruje u smislu ubrzanja slijeganja, odnosno povećanja propusnosti, sa sekundarnim učinkom povećanja vrijednosti parametara deformabilnosti. Kod propusnijih vrsta tla, kao što su pijesci, šljunci, primarno poboljšanje je ojačanje temeljnog tla.

Granice primjene PDVZ

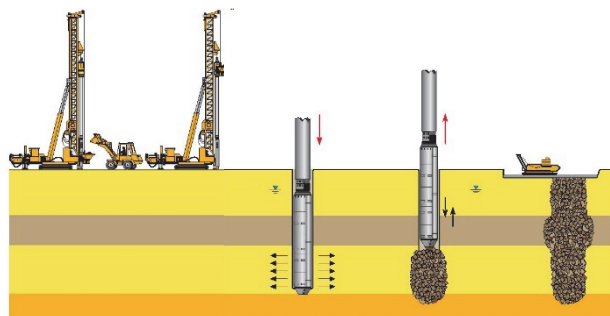


Slika 1. Granice primjene šljunčanih pilota

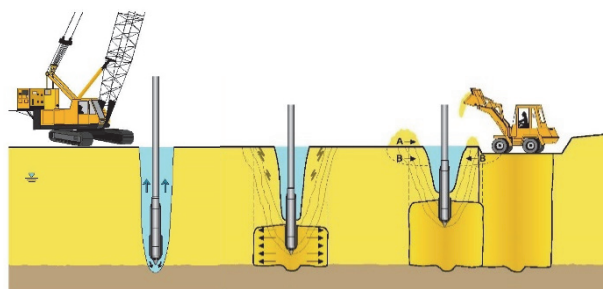
Tehnologija izvedbe šljunčanih pilota provodi se dubinskim vibracijskim punjenjem i/ili zbijanjem osnovnog kontinuuma tla.

Izvedba se provodi spuštanjem vibratora do projektom predviđene dubine. Postupak zbijanja se provodi odozdo prema površini terena (Slike 2 i 3). Dubinski vibrator je u obliku cilindra, promjera 30 do 50 cm, dužine 3 do 4 m, ovisno o tipu, te mase cca 2 tone. U donjem dijelu vibratora, odmah iznad šiljka, nalazi se ekscentrična masa s okretnim pogonom od elektromotora (snage do 150 kW). Na taj način proizvodi se rotacijski udar velike energije. Dubinski vibrator produžuje se pomoću natačnih cijevi do proizvoljne duljine, a vođenje osigurava posebni uređaj. U sitnozrnim tlima izvodi se zbijanje sa dodavanjem šljunka. Na taj se način dobivaju šljunčani stupnjaci, koji se mogu, u ovisnosti o projektnim zadacima, ojačati cementnom ili bentonitnom smjesom (Slika 2).

Vibracijsko zbijanje u krupnozrnim tlima izvodi se zbijanjem postojećeg tla na način da se izvedu stupnjaci veće gustoće, s boljim zahtijevanim karakteristikama (Slika 3). Za slučaj kada se izvode šljunčani piloti ojačani cementom otpada funkcija pilota kao drena.



Slika 2. Postupak vibracijskog zbijanja u sitnozrnim tlima



Slika 3. Postupak vibracijskog zbijanja u krupnozrnim tlima

3. UPORABA ŠLJUNČANIH PILOTA NA PROJEKTU TRAFOSTANICA SISAK

Na predmetnoj lokaciji u Sisku planira se izgradnja transformatorske stanice. Teren je blago zakošen s rasponom kota cca 98 – 103 m.n.m. i s padom u smjeru jugoistok – sjeverozapad. Tlocrtna površina zahvata lokacije je cca 3400 m².

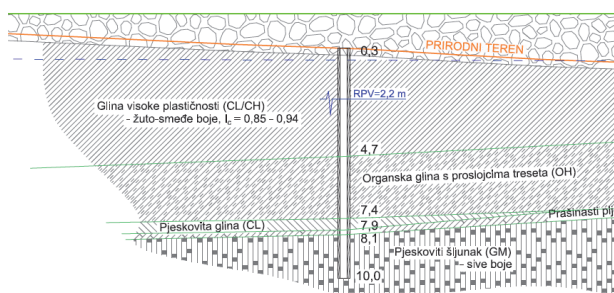
U sklopu buduće trafostanice planirano je izvođenje različitih vrsta objekata u smislu geometrijskih karakteristika i vrijednosti proračunskih opterećenja. S obzirom na projektne zahtjeve kote nula objekta, potrebno je izvesti i nasip promjenjive debljine.

Na slici 4 može se vidjeti geotehnički profil slojeva tla, izrađen na temelju geotehničkih istražnih radova koji je ujedno i jedan od proračunskih profila za analizu vremenskog toka slijeganja. Uočavaju se dva sloja slabo propusnih materijala (glina niske i visoke plastičnosti i organski materijal visoke plastičnosti). Usvojene vrijednosti proračunskih parametara ovih slojeva prikazane su u tablici 1:

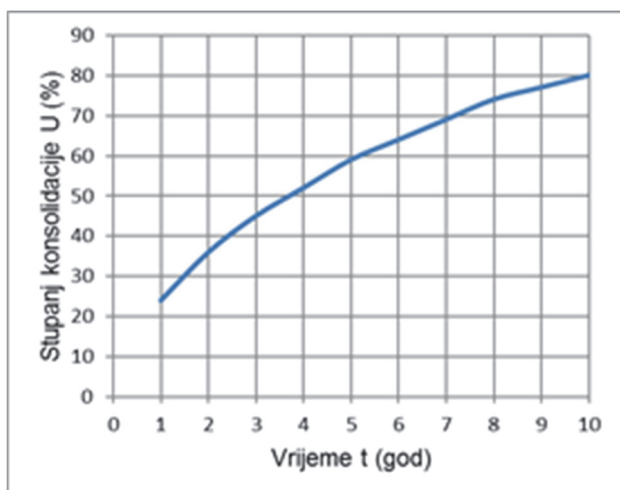
Tablica 1. Proračunski parametri slabo propusnih slojeva

Sloj	Koeficijent vodopropusnosti k [m/s]	Modul stišljivosti M_v [kN/m ²]	Debljin a sloja d [m]
CL/CH (sloj 1)	$k_1 = 3.68 \times 10^{-11}$	$M_{v1} = 5000$	4.7
OH (sloj 2)	$k_2 = 3.5 \times 10^{-10}$	$M_{v2} = 1200$	3.3

U geotehničkom elaboratu (*Geotehnički elaborat, Temeljenje transformatorske stanice u Sisku, Geokod d.o.o., Zagreb*) provedena je proračunska analiza vremenskog toka slijeganja ispod nasipa debljine 3 m. Rezultati pokazuju da je za 80% konsolidaciju slabije propusnih slojeva gline i organske gline potrebno 10 godina. (Slika 5). To je neprihvatljivo dugo vremensko razdoblje, zbog čega je bilo potrebno iznaći rješenje za ubrzanje slijeganja i/ili ojačanja temeljnog tla.



Slika 4. Geotehnički profil tla na lokaciji /proračunski profil slijeganja

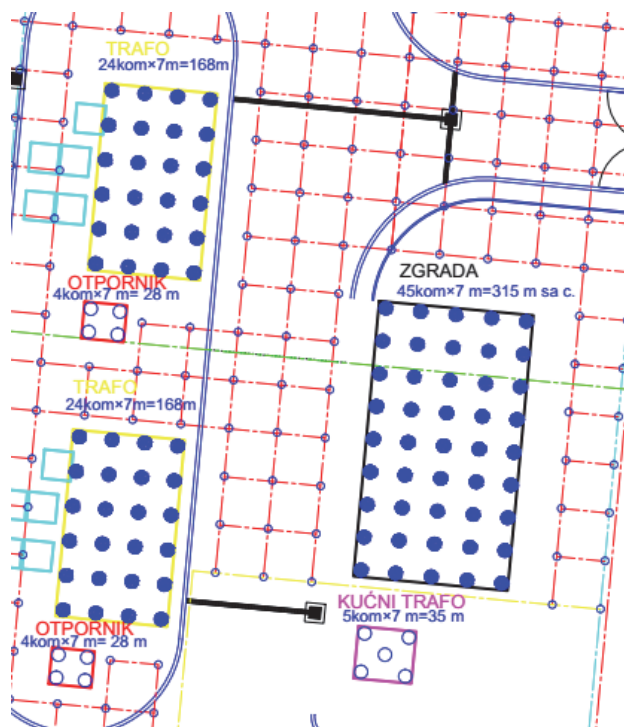


Slika 5. Rezultati proračuna vremenskog toka slijeganja

Rješenje ubrzanja konsolidacijskih procesa u slabo propusnim slojevima tla riješeno je projektom izvedbe šljunčanih pilota s dvostrukim ciljem: Na dijelu predmetnog tlocrta, gdje nisu planirani novi objekti na nasipu, uloga šljunčanih pilota je dominantno za ubrzanje konsolidacije, dok je sporedni efekt ojačanje temeljnog tla. Ispod objekata, gdje su definirana vanjska proračunska nepovoljna djelovanja relativno velika, situacija je obrnuta. Šljunčani piloti prvenstveno imaju ulogu ojačanja temeljnog tla, uz sekundarno djelovanje ubrzanja vremenskog toka slijeganja.

Ispod nasipa su predviđeni šljunčani piloti promjera $d = 40$ cm (duljine $l = 7, 10$ i 13 m) na kvadratnom rasteru $s = 2.5$ m. Ispod objekata je računski promjer $d = 70$ cm ($l = 7, 10$ i 13 m) s različitim tlocrtnim rasporedom, a sve u funkciji proračunskih vrijednosti vanjskih nepovoljnih djelovanja. Ispod objekata zgrade i same trafo-stanice predviđa se izvedba šljunčanih pilota ojačanih cementom.

Proračunsko trajanje 90 %-tne primarne konsolidacije je tri mjeseca. Nakon ovog perioda, proračunsko slijeganje nasipa i objekata na nasipu u tijeku eksploatacije se očekuje u vrijednosti do 2 cm. Odabir projektnog rješenja prvenstveno je ovisio o trajanju i vrijednostima slijeganja, a ne o kriteriju nosivosti temeljnog tla. Zahtijevana, odnosno propisana margina sigurnosti s obzirom na pojavu graničnog stanja pojave sloma tla je proračunski dokazana.



Slika 6. Fragment situacijskog prikaza projekta poboljšanja TS Sisak

4. PRIMJENA ŠLJUNČANIH PILOTA NA SANACIJI TLA U RUGVICI

U mjestu Rugvica, projektiran je, i u međuvremenu izveden servisno poslovni objekt (*GEO-LAB d.o.o., Zagreb, Geotehnički elaborat*)

Građevina se sastoji od poslovnog dijela, montažne hale i monolitne hale s galerijom. Temeljenje poslovnog dijela predviđeno je na temeljnim trakama širine 60 i 70 cm, a hale na temeljnim stopama tlocrtnih dimenzija 3×3 m.

Prema geotehničkom izvještaju tlo je građeno od nisko plastične pjeskovite gline lako do srednje gnječivog konzistentnog stanja. Razina podzemne vode registrirana je na dubini između 1,0 i 1,5 m od površine terena. Vrijednosti vanjskih nepovoljnih djelovanja su takve da su proračunska slijeganja neprihvatljivo velika. Osim toga, s obzirom na vrijednosti koeficijenata vodopropusnosti, slijeganja bi trajala neprihvatljivo dugi vremenski period. Provedena je sanacija tla u smislu njegova ojačanja, ne nužno i ubrzanja slijeganja. Vrijednosti parametara deformabilnosti saniranog tla dovoljno su velike da je slijeganje svedeno na prihvatljivu mjeru.

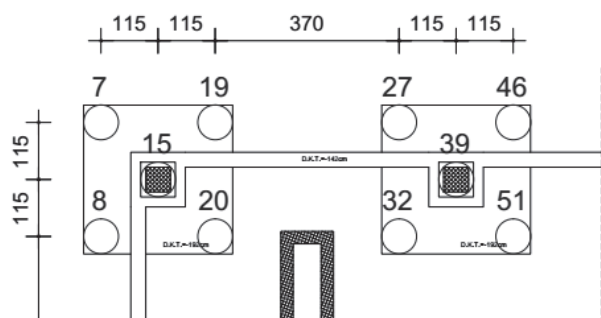
Za potrebe projektiranja i izrade geostatičkih proračuna usvojen je model tla preuzet iz geotehničkog izvještaja (*Geotehnički elaborat, Proizvodni objekt – IT4, Geokod d.o.o., Zagreb*), prikazan u **tablici 2**.

Tablica 2. Proračunski parametri tla u Rugvici

Dubina (m)	Oznaka tla	Opis tla	M_v (MPa)	\square (kN/m)
0,0 – 3,5	CI/CL	Pjeskovita glina, srednje gnječive konzistencije	3,0	19
3,5 – 8,0	CI/CL	Pjeskovita glina, niske do srednje gnječive konzistencije	2,5	19

Računsko slijeganje objekta bez provedbe dodatnih mjera na temeljenju iznosi između 6 i 9 cm. Kao mjera ojačanja tla i ubrzanja slijeganja izvedeni su šljunčani stupovi prema slijedećem redosljedu:

1. Skidanje humusa i izravnavanje terena
2. Izvedba radnog planuma od drobljenog kamena ili šljunka debljine 50 cm za nesmetano kretanje stroja na gusjenicama;
3. Iskolčenje građevinskih osi;
4. Iskolčenje šljunčanih stupova (točke poboljšanja);
5. Izvedba dubinskog zbijanja do projektirane dubine;
6. Iskop za temelje sa produbljenjem 30 cm ispod donje kote temelja. U produbljenje se ugrađuje sloj kamenog materijala i uvalja na modul zbijenosti 20 MPa;
7. Betoniranje temelja.



Slika 7. Dio tlocrta poboljšanja ispod temeljnih stopa

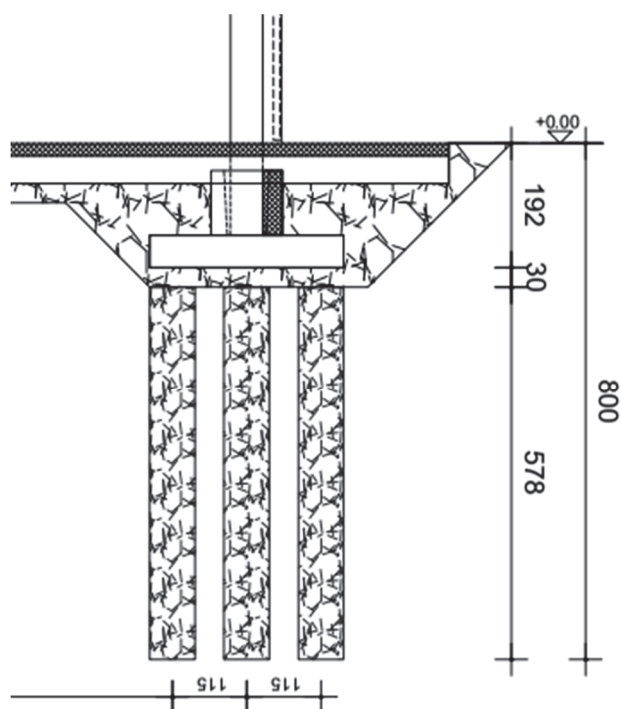
Temeljne Stope su tlocrtnih dimenzija 3×3 m temeljene na dubini 1.5 m (**Slika 7**). Kontaktno naprezanje na temeljno tlo iznosi 130 kN/m². Po stupnom mjestu izvedeno je 5 šljunčanih stupova do dubine 8 m. Utjecajna dubina iznosi oko 7 m. Računski promjer šljunčanih stupova je 80 cm, 5 stupnjaka po stopi, prosječna dubina

poboljšanja 8 m, kut unutarnjeg trenja drobljenog kamena je 40°.

Proračunsko slijeganje temeljne stope prije poboljšanja je procijenjeno 8.52 cm. Slijeganje stope nakon poboljšanja, uz faktor poboljšanja prema Pribe-u od 2.0, iznosi 2.69 cm.

Temeljne trake su širine 60 i 70 cm na dubini 1.0 m. Kontaktno naprezanje na temeljno tlo iznosi 160 kN/m². Osni razmak između šljunčanih stupova iznosi između 1.9 i 2.0 m, a dubina poboljšanja je 8 m. Utjecajna dubina iznosi oko 6 m. Računski promjer šljunčanih stupova je 80 cm, osni razmak 2 m, prosječna dubina poboljšanja 8 m, kut unutarnjeg trenja drobljenog kamena je 40°.

Slijeganje temeljne trake prije poboljšanja iznosi oko 6 cm, a nakon poboljšanja šljunčanim stupovima oko 2 cm.



Slika 8. Dio presjeka poboljšanja ispod temeljnih stopa

5. SANACIJA TLA ŠLJUNČANIM STUPNJACIMA U PLOČAMA

Za potrebe izrade geotehničkog elaborata i glavnog projekta za ulazni terminal u Luku Ploče, objekt uprave i kontrole prometa i pripadne prometne površine INSTITUT IGH d.d., Zavod za geotehničko projektiranje, je izveo opsežne geotehničke istražne radove.

Terenski radovi provedeni su u kolovozu i rujnu 2009., a laboratorijska ispitivanja su završena u veljači 2010. godine. Svrha ovih radova je bila dobivanje uvida u geotehnička obilježja lokacije i potrebnih podataka za izradu glavnog projekta (*Ulazni terminal Luke Ploče s pristupnom cestom i parkiralištima, Institut IGH d.d., Zavod za geotehniku*).

Objekt se sastoji se od 4 poslovne jedinice – lučke uprave, carine, policije i špedicije koje su povezane središnjim dijelom u kojem se nalaze ulazni dio, info pult

i dizalo koji povezuje sve jedinice u jedan zajednički povezani prostor. Poslovni dio zgrade carine i lučke uprave je tlocrtnih dimenzija 13,3×42,0 m, policije 26,4×13,3 m i zgrade špedicije 34,90×13,30 m.

Objekti su temeljeni na armiranobetonskoj ploči na prethodno poboljšanom tlu. Sve 4 poslovne jedinice su međusobno dilatirane.

Kako bi se objekt visinski povoljno smjestio u odnosu na trasu Spojne ceste potrebno je izvesti nasipavanje cijelog područja za oko 1,7 m što je s geotehničkog stajališta nepovoljno i uzrokovat će znatna slijeganja. Osim toga nasipavaju se i okolne prometne površine tako da će velika površina biti opterećena. Relativna kota objekta ±0,00 m je 3,2 m n.m., a teren se nalazi na koti oko 1,5 m n.m.

Tlo na lokaciji je vrlo loših mehaničkih karakteristika i predstavlja iznimno nepovoljnu sredinu za temeljenje objekta.

Na osnovi rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja i za potrebe odabrane metode temeljenja, određene su sljedeće dvije geotehničke sredine:

1. GEOTEHNIČKA ZONA 1. [dubina od 0 do 10 m]: prema podacima koji su dobiveni in-situ ispitivanjima (CPTU i istražno bušenje) izrazito je heterogena. Sačinjavaju je pretežno pjeskoviti materijali s proslojcima/slojevima praha i gline niske plastičnosti, (SM, ML/SM i ML/CL), debljina sloja je 10 m, zapreminska težina tla $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, nedrenirana posmična čvrstoća tla $c_u=20 \text{ kPa}$, korigirana vrijednost otpora na vrhu $q_t=0.6 - 1.35 \text{ MPa}$, broj udaraca SPT-a: $N=4-9$

2. GEOTEHNIČKA ZONA 2. [ispod 10 m]: sačinjavaju pretežno prašnasti i glinoviti materijali niske plastičnosti (CL/ML, ML), prisutni proslojci pijeska zapreminske težine $\gamma=17 - 18 \text{ kN/m}^3$, nedrenirana posmična čvrstoća tla $c_u=25 - 70 \text{ kPa}$, korigirana vrijednost otpora na vrhu $q_t=0,5 - 1,8 \text{ MPa}$, broj udaraca SPT-a $N=5-8$.

Tlo je saturirano podzemnom vodom tj. razina podzemne vode je tijekom godine konstantno oko površine terena, od minimalno oko 50 cm ispod površine do plavljenja područja, a na dnevne oscilacije utječu plima i oseka.

Razina podzemne vode u vrijeme ispitivanja je registrirana na koti od -0,1 m do -0,4 m od površine terena.

5.1. Tehničko rješenje poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije

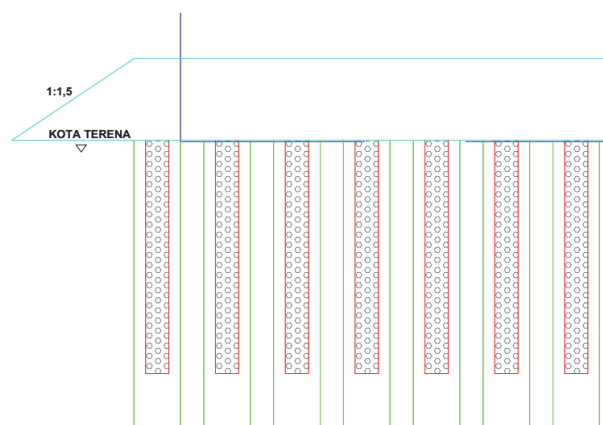
Tlo na lokaciji zgrade lučke uprave je građeno od mekanih marinskih sedimenata male nosivosti i velike stišljivosti. Kako bi se osigurala nosivost plićih slabonosivih slojeva tla, ubrzala konsolidacija, slijeganje zgrade svelo na prihvatljivu razinu s aspekta uporabivosti i eliminirala mogućnost likvefakcije projektirano je sljedeće rješenje poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije:

- ugradnja šljunčanih pilota promjera 100 cm
- ugradnja prefabriciranih vertikalnih drenova od polipropilena (tip Cofra MD7007 ili ekv.)
- predopterećenje u trajanju od minimalno 4 mjeseca

Šljunčani piloti se ugrađuju do dubine 10 m ispod površine terena (imaju dvojni ulogu poboljšanja tla i dreniranja), a polipropilenski drenovi do dubine 22 m ispod površine terena (ispod razine gdje je $\Delta\sigma_v = 20\% \sigma_g$). Šljunčani piloti su u kvadratnom rasporedu na razmaku 3 x 3 m i u trokutnom rasporedu 2.5 i 2.8 m (Slika 9).

Nakon ugradnje šljunčanih pilota i drenova u tlo provodi se pred opterećenje nasipom 30 % većeg intenziteta od konačnih vrijednosti opterećenja ispod temeljne ploče. Visina nasipa za pred opterećenje je 3.5 m, dok je vrijeme njegova djelovanja minimalno 4 mjeseca. Odluka o nastavku gradnje se donosi na osnovu obrade dobivenih rezultata mjerenja.

Na osnovi prethodnih iskustava, stečenih tijekom izgradnje i praćenjem slijeganja u Čvoru Čeveljuša (nalazi se u neposrednoj blizini) i objekata u sklopu Luke Ploče očekuju se znatne vrijednosti slijeganja, ponajviše uvjetovanih procesima sekundarne konsolidacije temeljnog tla. Ukupna slijeganja su prognozno na ±30% od proračunom dobivenih vrijednosti.



Slika 9. Dio presjeka poboljšanja temeljnog tla u Pločama

6. ZAKLJUČAK

Primjena šljunčanih pilota pokazuje se, na nizu inženjerskih zadataka širokog raspona, kao optimalno rješenje. Dokazana je pozitivna uporaba na različitim vrstama tla, a s obzirom na tražena hidraulička svojstva, te zahtijevane vrijednosti parametara deformabilnosti i posmične čvrstoće. Istovremeno ova tehnologija u potpunosti zadovoljava stroge ekološke norme i standarde, koji vrijede u tehničkoj regulativi RH.

Prikazani su primjeri uspješnih sanacija temeljnog tla različitim svojstava. Tehnička rješenja su uključila postupke ubrzanja konsolidacije tla i/ili njegove sanacije u smislu povećanja vrijednosti deformacijskih modula i parametara posmične čvrstoće.

Navedena su rješenja primjenom različitih sustava u raznovrsnom temeljnom tlu: šljunčani piloti po cijelom tlocrtu predmetnog objekta, dijelom u kombinaciji s ojačanjem cementom, varijanta s primjenom šljunčanih pilota ispod konstruktivnih elemenata, te rješenje s kombinacijom prefabriciranih vertikalnih drenova.

Optimizacija uporabe opisanih tehnologija uključuje odgovarajući raspon provedbe geotehničkih istražnih

radova u skladu s važećom tehničkom regulativom. Potrebno je, uz detaljnu provedbu istražnih radova, i korektno poznavanje načina i tehnologije rada spomenutih postupaka. Odabir projektiranog rješenja mora biti potvrđen izvedbom odgovarajućeg pokusnog polja, gdje će projektni elementi biti potvrđeni i eventualno opovrgnuti. Na taj način će se strogo primjenom propisanih postupaka doći do optimalno rješenja na konkretnoj inženjerskoj zadaći.

Konačna potvrda uspješnosti primijenjenih rješenja mora uključiti odgovarajuće postupke kontrole kvalitete izvršenih radova, te detaljnu provedbu tehničkih promatranja ponašanja konstrukcije i temeljnog tla u odgovarajućem vremenskom razdoblju. Rezultati dobiveni provedbom tehničkih mjerenja će tada poslužiti za izradu povratnih analiza, te stvaranje konačnih zaključaka o uspješnosti primijenjenog rješenja.

7. LITERATURA

EN 14731:2005, Execution of special geotechnical works – Ground treatment by deep vibration

HRN EN 1997-1:2012/NA, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila – Nacionalni dodatak;

HRN EN 1997-1:2012, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004+AC:2009)

HRN EN 1997-2:2012, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 2. dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla (EN 1997-2:2007+AC:2010)

Geotehnički elaborat, Temeljenje transformatorske stanice u Sisku, Geokod d.o.o., Zagreb, TD 07/10, svibanj 2010.

Geotehnički elaborat, Proizvodni objekt – IT4, Geokod d.o.o., Zagreb, TD 11/07, ožujak 2007.

GEO-LAB d.o.o., Zagreb, Geotehnički elaborat br. 107/2008, srpnja 2008.

Priebe, Heinz J. (1943), The design of vibro replacement, Ground Engineering, December 1995, Technical paper GT 07-13 E

Terzaghi, Karl (1943), Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, Inc., p.265

Ulazni terminal Luke Ploče s pristupnom cestom i parkiralištima, Investitor: Lučka uprava Ploče, Izradio: Institut IGH d.d., Zavod za geotehniku, 3300-468-2010, prosinac 2011., knjiga G01



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET
ZAVOD ZA HIDROTEHNIKU

DJELATNOSTI ZAVODA ZA HIDROTEHNIKU:

Nastava:

Preddiplomski i diplomski studijski program
«Inženjerstvo okoliša»

Međunarodni doktorski studij
«Geo-Engineering and Water Management»

Poslijediplomski specijalistički
studij «Ekoinženjerstvo»

Znanstvena istraživanja:

Iz područja upravljanja i zaštite podzemnih i površinskih voda

Stručni rad:

Zaštita krških vodonosnika
Vodoistražni radovi

Upravljanje površinskim i podzemnim vodama

Hidrogeološka, hidrološka i inženjerskogeološka istraživanja

Hidrogeokemijske analize i istraživanja

Agrokemijske analize tla

Geografski informacijski sustav

Izrada karata prirodne ranjivosti vodonosnika

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

Varaždin, Hallerova aleja 7, Tel: +385 (0) 42 408 900, Fax: +385 (0) 42 313 587

Email: hmeaski@gfv.hr, www.gfv.unizg.hr





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

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



LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

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



Zavod za hidrotehniku LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

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



LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

Laboratorij za geokemiju okoliša osnovan je u sklopu Zavoda za hidrotehniku Geotehničkog fakulteta u Varaždinu. Laboratorij sudjeluje u izvođenju praktične nastave iz kolegija preddiplomskog i diplomskog studija te Zdrženog međunarodnog doktorskog studija kao i u znanstvenim te stručnim projektima. Na svim sučinjama svoju obrazovnu, znanstvenu i stručnu svrhu. Smješten je na 100 m² prostora i opremljen modernom opremom za provedbu geokemijskih terenskih i laboratorijskih ispitivanja, što uključuje prikupljanje uzoraka tla, sedimentata i vode.

Pokazatelji kiselosti: mierzmo i uzorcima voda, eluata tala i sedimentata:

- atomskom apsorpcijskom spektrometrijom: Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Si, Sr, Ti, V, Zn
- amonijak, nitriti, nitrati, ukupni dušik
- bromidi, fenoli, fluoridi, fosfati, jodidi, kloridi
- silikati, sulfidi, sulfati, sulfiti
- suspendirana tvar, mutnoća, KPK
- alkalitet, ukupna tvrdoća, karbonatna tvrdoća, nekarbonatna tvrdoća
- kalcijeva tvrdoća, magnezijeva tvrdoća
- slobodni CO₂, koncentracija otopljenog kisika i zasićenost kisikom
- pH, električna vodljivost, ukupna otpornost na 2 - JDS
- trajanje podzemnih tokova (koncentracija matrigijevog fluorescencijal)
- ukupni organski ugljik i ukupni dušik - TOC/DOC/TN
- razaranje tla zlatopopkom
- ekstrakcija izmjenjivih kationa iz tla amonijevim acetatom i kalijevim kloridom

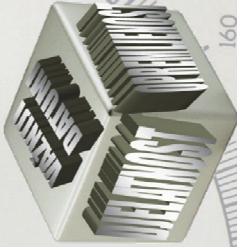
Kontakt: doc.dr.sc. Anita Piteček Stročić
 voditeljica laboratorija
 tel. 042 / 408 - 957
 e-mail: anita.pitecek.strocc@gfv.hr

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

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

LABORATORIJSKA ISPITIVANJA OPĆENITO

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



1. Opća fizikalna svojstva tla

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

2. Klasifikacijski testovi

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

3. Čvrstoća tla

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

4. Deformabilnost tla

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

5. Posebna svojstva tla

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

SVUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET
 Hallerova aleja 7, 42 000 Varaždin

GEOTEHNIČKI LABORATORIJ

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

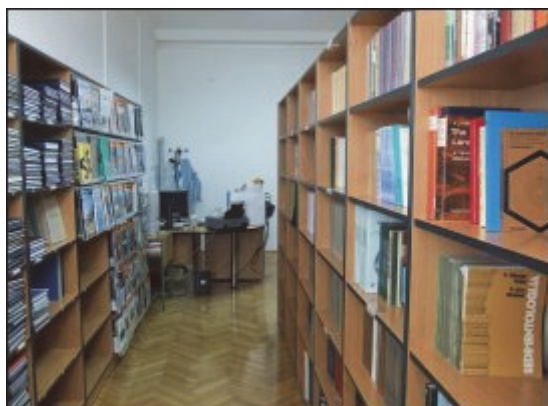


- Oformljen 1974. god. u sastavu tadašnje Više geotehničke škole
- Godine 2006. potpuno obnovljen, moderniziran i proširen
- Član udruge Hrvatski laboratoriji CROLAB
- Akreditiran od HAA prema normi HRN EN ISO/IEC 17025

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



Knjižnica Geotehničkog fakulteta



Izdavačka djelatnost

Časopis „Inženjerstvo okoliša“



Sveučilišni udžbenici



UPUTE AUTORIMA

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

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

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

The journal is published biannually. There are no charges for printing the paper. As a rule, the length of the paper is not limited. However, it is recommended that it should not be longer than 15 single-spaced A4 pages, all figures included.

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

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

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

Authors should submit their paper by e-mail to: **casopis@gfv.hr**. The paper should be prepared in Microsoft Word in A4 page format, with 25mm margins and 1.5 line spacing, in one column aligned to both sides. The text should be written in 10pt Times New Roman, and the pages should have automatic numbering in the bottom right corner. Depending on the content, the text should be divided into several sections whose headings are in 12 pt

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

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

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

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

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