

PRORAČUN TRENUTNOG SLEGANJA TLA USLED SNIŽENJA NIVOA PODZEMNE VODE U FAZI GRADNJE PRIMENOM SOFTVERA WELL- DRAIN

CALCULATION OF SOIL SUBSIDENCE DUE TO DEWATERING IN CONSTRUCTION PHASE USING WELL-DRAIN SOFTWARE

Filip Stanić¹, Željko Vasilic² i Anja Randelović³

¹ Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd. E-mail: fstanic@grf.bg.ac.rs

² Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd. E-mail: zvasilic@grf.bg.ac.rs

³ Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd. E-mail: arandelovic@grf.bg.ac.rs

APSTRAKT: *Primena bunara za sniženje nivoa podzemne vode u fazi izgradnje objekta je standardna praksa u zemlji i svetu. Međutim, proračun trenutnog sleganja tla usled sniženja se retko sprovodi. Sniženje nivoa podzemne vode izaziva smanjenje poreznog i povećanja efektivnog pritiska, što dovodi do zbijanja tla, odnosno sleganja. Pomenute deformacije se mogu opisati Terzaghi-jevim nelinearnim modelom koji pretpostavlja linearnu vezu između modula stišljivosti i efektivnih napona u tlu. Ovaj model je integrisan u softver WELL-DRAIN koji je razvijen na Institutu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Beogradu i koji se koristi za proračun prostornog sniženja nivoa podzemne vode u vremenu kao posledica rada bunara. Dobijeni rezultati sniženja se zatim koriste kao ulazni podaci za proračun posledičnog prostornog sleganja tla u vremenu. Pomenuti softver je već primenjivan u praksi, a u ovom radu su prikazani rezultati sleganja dobijeni za jednu lokaciju u Beogradu na kojoj je za izgradnju objekta sa tri podzemne etaže neophodno sniziti nivo podzemne vode za 9 m. U tu svrhu je planirana izrada 22 bunara ukupnog kapaciteta 176 L/s koji su raspoređeni duž linije iskopa. Rezultati jasno ukazuju na značajno sleganje tla od preko 7 cm u neposrednoj zoni izvan iskopa, zbog čega je predloženo alternativno rešenje kojim se ne dovode u opasnost okolni objekti i infrastruktura.*

Ključne reči: *sleganje, sniženje podzemne vode, WELL-DRAIN softver, Terzaghi*

ABSTRACT: *The use of pumping wells to lower the groundwater during the construction phase is a standard practice worldwide. However, the consequent soil subsidence due to the groundwater lowering is rarely addressed. The groundwater lowering of causes a decrease in pore pressure and an increase in effective stress, leading to soil compaction and subsidence. These deformations can be described using Terzaghi's nonlinear model, which assumes a linear relationship between the compressibility module and the effective stresses in the soil. This model is integrated into the WELL-DRAIN software, developed at the at the University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering, and used primarily for calculation of spatial groundwater lowering caused by operating wells. The groundwater lowering data are then used as an input for calculation of the resulting spatial soil subsidence over time. This software has already been applied in engineering practice, while this paper presents the soil subsidence results obtained for a location in Belgrade, where lowering the groundwater level by 9 meters is necessary for constructing a building with three underground floors. For this purpose, 22 wells with total capacity of 176 L/s are planned to be built along the excavation line. The results clearly indicate the significant soil subsidence of over 7 cm outside the excavation zone, prompting an alternative solution to avoid endangering surrounding buildings and infrastructure.*

Key words: *subsidence, lowering groundwater level, WELL-DRAIN software, Terzaghi*

UVOD

Sleganje tla, kao posledica sniženja nivoa podzemne vode je sve aktuelniji problem, posebno u područjima gde je eksploatacija podzemnih voda intenzivna. Crpljenje vode iz akvifera doprinosi opadanju nivoa podzemne vode zbog čega dolazi do smanjenja poreznog odnosno povećanja efektivnih pritisaka u tlu i zbijanja zemljišta. S obzirom da tlo nije elastičan materijal, najveći deo ovih deformacija je trajan. Najpoznatiji primer sleganja zbog nekontrolisane eksploatacije podzemnih voda je Venecija, gde je u periodu od 1952 do 1969. godine registrovano sleganje od preko 10 cm (Gambolati et al., 1973), nakon čega je izvorište zasnovano na dubokim bunarima pod pritiskom, iz kojih se Venecija delom snabdevala vodom, napušteno, što je u velikoj meri i rešilo problem. Još jedan ekstremni primer je Iran, gde godišnja vrednost sleganja u nekim delovima dostiže i 100 mm (Goorabi et al., 2020). Pored ovih ekstremnih primera gde

glavnu ulogu ima konstantno opadanje pijezometarske kote u vodonosnom sloju pod pritiskom koji se eksploatiše, značajne vrednosti trenutnog sleganja se mogu javiti i pri sniženju nivoa podzemne vode za potrebe izgradnje objekata. Da bi se omogućilo izvođenje radova u suvom, za sniženje se najčešće koriste vertikalni bunari koji prilikom eksploatacije formiraju depresioni levak, zbog čega se mogu javiti značajna sleganja koja su pri tom i prostorno neravnomerna.

Očigledno je da postoji potreba da se sleganje u vremenu i prostoru modelira (Budhu & Adiyaman), pri čemu je, u ovom slučaju, najčešće dovoljno tačno razmatrati samo vertikalne deformacije (Ritzema, 1994). Trenutno sleganje se može modelirati primenom dva modela – jednostavnog linearnog elastičnog modela ili nelinearnog Terzaghi-jevog modela. Proračun se sprovodi odvojeno od modela dinamike podzemnih voda, gde se rezultati promene nivoa podzemne vode koriste kao ulazni podaci za proračun sleganja. Iako razdvajanje ova dva fizička procesa nije u potpunosti opravdano jer su mehaničke i hidrauličke karakteristike tla međusobno povezane, za vodonosne slojeve se može smatrati da sleganje, odnosno zbijanje ne utiče značajno na njihovu vodoprovodljivost. Iako modeli za simulaciju dinamike podzemnih voda već postoje (Huges et al., 2017), modeliranje sleganja kao prirodne posledice sniženja nivoa podzemne vode nije postalo deo standardne prakse.

U ovom radu je predstavljen model za proračun sleganja integrisan u softver WELL-DRAIN koji je razvijen na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu – Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo. Pored modula koji se odnosi na sleganje koristi se i modul za proračun sniženja nivoa podzemne vode, čiji rezultati predstavljaju ulazne podatke za proračun sleganja. Softver WELL-DRAIN se primenjuje u inženjerskoj praksi, a u radu su prikazani rezultati proračuna sniženja nivoa podzemnih voda i posledičnog sleganja na jednoj lokaciji u Beogradu.

METODOLOGIJA – PRORAČUN SLEGANJA

Zemljište u vodonosnom sloju (akviferu) je zasićeno, odnosno olakšano u vodi i pri promeni (smanjenju) pritiska vode (porni pritisak) p [kN/m²] usled sniženja nivoa podzemne vode dolazi do promene (povećanja) efektivnog pritiska tla σ_z' [kPa=kN/m²]. Ukupan vertikalni napon u tlu σ_z [kN/m²] je zbir efektivnog pritiska i pritiska vode:

$$\sigma_z = \sigma_z' + p \quad (1)$$

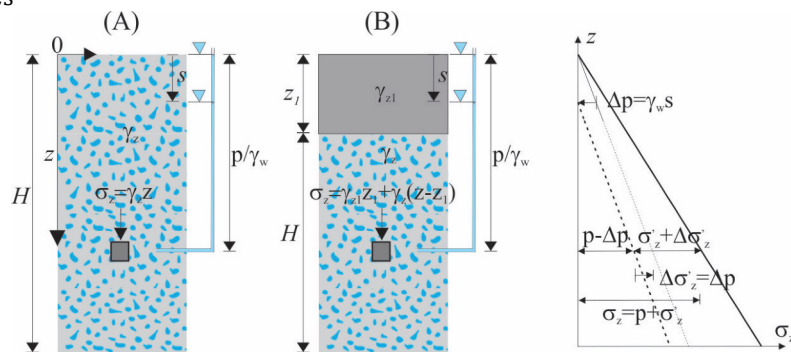
pri čemu se σ_z' i p u slučaju akvifera sa slobodnom površinom (Slika 1A), odnosno pod pritiskom (Slika 1B), računaju na sledeći način:

$$\sigma_z' = \begin{cases} (\gamma_z - \gamma_w)z & \text{akvifer sa slobodnom površinom} \\ (\gamma_{z1} - \gamma_w)z_1 + (\gamma_z - \gamma_w)(z - z_1) & \text{akvifer pod pritiskom} \end{cases} \quad (2)$$

$$p = \gamma_w z \quad (3)$$

gde su γ_{z1} , γ_z i γ_w zapremisne težine zasićenog povlatnog sloja (ako je akvifer pod pritiskom), zasićenog vodonosnog sloja i vode [kN/m³]. Sa dijagrama napona na slici 1 (dijagram desno) se jasno vidi da usled sniženja nivoa podzemne vode dolazi do smanjenja pornog i povećanja efektivnog pritiska u tlu. Ukupni vertikalni napon σ_z ostaje nepromenjen (zbir jednačina 2 i 3) jer se smatra da i nakon sniženja zemljište ostaje gotovo zasićeno sa nepromenjenom zapreminskom težinom γ_z . S obzirom da smanjenje pornog pritiska odgovara sniženju nivoa podzemne vode s [m], povećanje efektivnog pritiska u tlu se može sračunati na osnovu prethodno sračunatog sniženja:

$$\Delta\sigma_z' = \Delta p = \gamma_w s \quad (4)$$



Slika 1. Naponi u tlu pri sniženju nivoa podzemne vode u vodonosnom sloju (A) sa slobodnom površinom; (B) pod pritiskom

Figure 1. Soil pressures after lowering the groundwater level in (A) unpressurized aquifer; (B) pressurized aquifer

Promena efektivnog pritiska u tlu izaziva vertikalne deformacije tla (ε_z) koje se mogu sračunati primenom dva modela: jednostavnog linearnog elastičnog modela, odnosno složenijeg nelinearnog Terzaghi-jevog modela. Linearni model pretpostavlja elastičnu sredinu koristeći konstantnu vrednost modula stišljivosti M_v [kN/m²] koji je preko Poasonovog koeficijenta ν [-] povezan sa modulom elastičnosti E [kN/m²] (jednačina 6):

$$\varepsilon_z = \int_{\sigma_{z0}'}^{\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z'} \frac{d\sigma_z'}{M_v} = \frac{\Delta\sigma_z'}{M_v} \quad (5)$$

$$M_v = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} = \text{const} \quad (6)$$

S druge strane, Terzaghi-jev model pretpostavlja linearnu zavisnost između M_v i σ_z' , izraženu preko koeficijenta kompresije C_c [-] i koeficijenta poroznosti e_0 [-]:

$$M_v = \frac{2.3(1+e_0)}{C_c} \sigma_z' \quad (7)$$

Ubacivanjem ovog izraza (7) u prethodni integral (jednačina 5) dobija se nelinearna (logaritamska) veza između efektivnog pritiska σ_z' i deformacija ε_z :

$$\varepsilon_z = \begin{cases} \frac{C_r}{1+e_0} \log_{10} \left(\frac{\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z'}{\sigma_{z0}'} \right), & \sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z' < \sigma_{zc}' \\ \frac{C_r}{1+e_0} \log_{10} \left(\frac{\sigma_{zc}'}{\sigma_{z0}'} \right) + \frac{C_c}{1+e_0} \log_{10} \left(\frac{\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z'}{\sigma_{z0}'} \right), & \sigma_{z0}' \leq \sigma_{zc}' \text{ i } \sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z' > \sigma_{zc}' \\ \frac{C_c}{1+e_0} \log_{10} \left(\frac{\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z'}{\sigma_{z0}'} \right), & \sigma_{z0}' > \sigma_{zc}' \end{cases} \quad (8)$$

gde je σ_{zc}' efektivni napon prekonsolidacije [kN/m²] i predstavlja vrednost maksimalnog prethodnog opterećenja tla, dok je C_r koeficijent rekompresije [-] koji je nekoliko puta manji od koeficijenta kompresije C_c i koristi se za proračun deformacije pri naponima manjim od σ_{zc}' . Koeficijenti C_c i C_r se određuju na osnovu Edomerskog opita stepenastim opterećenjem (promena koeficijenta poroznosti pri različitim vertikalnim naponima) na sledeći način:

$$C_c = \frac{\Delta e_c}{\log_{10} \left(\frac{\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z'}{\sigma_{z0}'} \right)} \quad (9)$$

$$C_r = \frac{\Delta e_r}{\log_{10} \left(\frac{\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z'}{\sigma_{z0}'} \right)} \quad (10)$$

gde su Δe_c i Δe_r promene koeficijenta poroznosti [-] pri opterećenju (povećanju efektivnog napona za $\Delta\sigma_z'$), odnosno rasterećenju (smanjenju efektivnog napona za $\Delta\sigma_z'$).

Za simulaciju sleganja u vremenu neophodno je korigovati vrednosti σ_{zc}' iz koraka u korak, pri čemu je početna vrednost $\sigma_{zc}' = \sigma_z - p_{min}$, gde se p_{min} odnosi na porni pritisak [kN/m²] pri istorijski minimalnoj koti nivoa podzemne vode. Obzirom da proračun sleganja prati proračun dinamike podzemne vode, neophodno je da se u vremenu koriguju i prethodne vrednosti efektivnog napona σ_{z0}' i koeficijenta poroznosti e_0 .

Terzaghi-jev model je detaljniji od linearnog elastičnog modela jer pored nelinearne veze između napona i deformacija uzima u obzir i efekat histerezisa, nastalog usled opterećenja i rasterećenja, koji je posledica fluktuacije nivoa podzemne vode. S tim u vezi, prethodna jednačina opisuje tri slučaja:

- kada se ponovno opterećenje u potpunosti odvija u oblasti koja je manja od napona prekonsolidacije: $\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z' < \sigma_{zc}'$
- kada se ponovno opterećenje delimično odvija u zoni rekompresije a delimično u zoni napona koji su veći od napona prekonsolidacije: $\sigma_{z0}' \leq \sigma_{zc}'$ & $\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z' > \sigma_{zc}'$
- kada se povećanje $\Delta\sigma_z'$ odvija u potpunosti u zoni napona koji su veći od napona prekonsolidacije: $\sigma_{z0}' > \sigma_{zc}'$.

Konačno, sleganje δ [m] se računa kao integral vertikalne deformacije tla po dubini vertikalnog profila gde je došlo do promene efektivnih pritisaka:

$$\delta = \int_0^H \varepsilon_z dz \quad (11)$$

gde je H ukupna debljina slojeva koji su zasićeni vodom [m] (Slika 1). S obzirom da neravnomernost vertikalnog sleganja tla δ u horizontalnoj ravni dovodi do potencijalnog rizika od oštećenja okolnih objekata i infrastrukture, predstavljeni proračun je potrebno sprovesti u zoni radijusa dejstva projektovanog drenažnog sistema.

REZULTATI

Predstavljena metodologija za proračuna sleganja integrisana je u softver WELL-DRAIN koji je razvijen na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu - Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo. U sklopu ovog softvera postoje dva modula. Prvi se odnosi na proračun dinamike sniženja nivoa podzemne vode u horizontalnoj ravni, na osnovu čega se kao rezultat dobijaju apsolutni nivoi podzemne vode ($NPV(x,y,t)$), odnosno sniženja nivoa podzemnih voda kao razlika u odnosu na početno stanje ($s(x,y,t)=NPV^{(0)}-NPV(x,y,t)$). Drugi modul se odnosi na proračun sleganja ($\delta(x,y,t)$) usled sračunatog sniženja primenom prethodno opisane metodologije. U nastavku su predstavljeni rezultati proračuna sleganja na primeru jedne lokacije u Beogradu gde je zbog izgradnje stambeno-poslovnog kompleksa koji se na jednom delu objekta ukopava tri etaže ispod površine terena, neophodno sniziti nivo podzemne vode $s_{max} = 9$ m kako bi se obezbedilo izvođenje radova u suvom. U tu svrhu predviđena je izrada 22 bunara kapaciteta $Q = 8$ L/s koji su raspoređeni duž građevinske linije unutar koje se vrši iskop. Na osnovu geotehničkih ispitivanja sprovedenih na ovoj lokaciji usvojen je pojednostavljeni geološki profil prikazan u Tabeli 1.

Tabela 1. Usvojeni geološki profil na lokaciji za koju je sproveden proračun sleganja

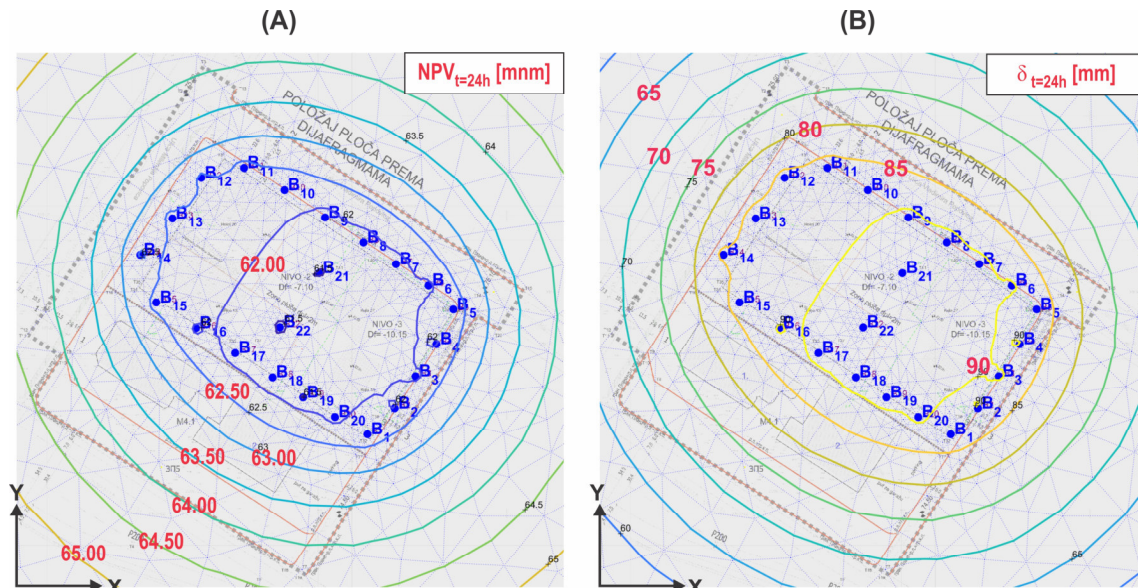
Table 1. Adopted geological profile on the location where subsidence calculation is performed

Sloj	γ_z [kN/m ³]	Debljina sloja [m]	Kota vrha sloja [mm]
Nasuti materijal	18.5	5.8	75
Prašinasti pesak	19.5	10.5	69.2
Šljunak	20	14	58.7
Laporovita glina	18.5	13.2	44.7

Debljina vodonosnog sloja je značajna i iznosi $H = 21$ m, između apsolutnih kota 65.7 mm i 44.7 mm, čime je obuhvaćen čitav sloj šljunka i deo sloja peska. Za proračun sleganja neophodno je prvo sračunati vrednosti sniženja nivoa podzemne vode nakon 24 h od početka rada sistema bunara kojima se crpi voda iz vodonosnog sloja ukupnim protokom od 176 L/s (22x8 L/s). Za proračun sniženja su pored tačnih pozicija bunara (označeni B1 do B22 na Slici 2) i njihovih protoka neophodne i hidrauličke karakteristike vodonosnog sloja, transmisivnost T i specifična izdašnost S_e , koje su određene na osnovu sprovedenog opita probnog crpljenja i u ovom slučaju iznose $T = 0.01$ m²/s i $S_e = 1 \times 10^{-4}$. Relativno mala vrednost specifične izdašnosti ukazuje na to da se radi o akviferu pod pritiskom. Na Slici 2A su prikazani rezultati proračuna dinamike nivoa podzemnih voda sprovedenog uz pomoć WELL-DRAIN softvera. Prikazane izolinije spajaju tačke sa istom apsolutnom kotom nivoa podzemne vode nakon 24h od početka rada bunara, iz čega se sniženje lako može odrediti kao razlika u odnosu na neporemećeni (početni) nivo podzemne vode koji iznosi $NPV^{(0)} = 71.00$ mm.

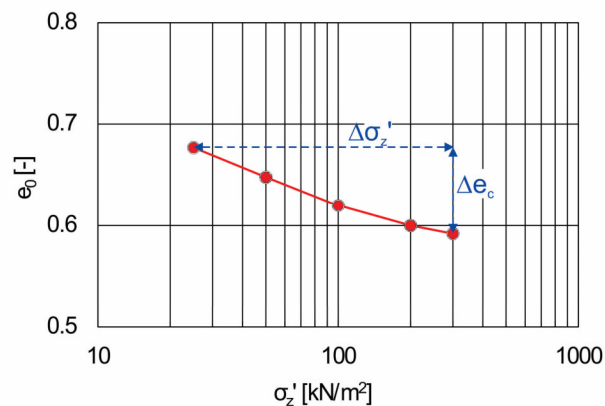
Pored sračunatih vrednosti $s(x,y,t=24h)$, za proračun sleganja Terzaghi-jevom modelom potrebno je definisati i mehaničke karakteristike vodonosnog sloja - koeficijente kompresije i rekompresije, C_c i C_r , kao i vrednost koeficijenta poroznosti e_0 . Ove vrednosti je moguće odrediti na osnovu Edomerskog opita čiji su rezultati prikazani na Slici 3, a koji je sproveden na uzorku tla iz vodonosnog sloja. Ako se σ_z' osa prikaže u logaritamskoj razmeri, eksperimentalni podaci se mogu aproksimirati linearnom regresijom čiji nagib odgovara vrednosti $C_c = 0.079$ (jednačina 9). S obzirom da rezultati opita pri stepenastom rasterećenju nisu dostupni, vrednost C_r je procenjena kao $C_c/10$. Iz istog opita moguće je odrediti i vrednost $e_0 = 0.6$ na osnovu vrednosti vertikalnog napona pri neporemećenim (početnim) uslovima, $\sigma_{z0} \approx 200$ kN/m². Konačno, kada su određene vrednosti svih ulaznih parametara moguće je sračunati vrednosti sleganja u vremenu uz pomoć WELL-DRAIN softvera. Na Slici 2B su prikazane izolinije sa istim vrednostima sleganja, nakon 24 h od početka rada bunara.

Na slici 2A je prikazano da projektovani sistem bunara može obezbediti zahtevano sniženje nivoa podzemnih voda od 9 m u zoni iskopa (kota 62 mm), ali i da dolazi do značajnog sniženja od 7-8 m neposredno izvan zone iskopa (kote između 63 mm i 64 mm). Posledično, izvan zone iskopa su sračunata i značajnija sleganja, koja iznose između 7 i 9 cm, čime se povećava rizik od oštećenja okolnih objekata i infrastrukture (važne saobraćajnice, vodovod, kanalizacija, šinski saobraćaj, itd.). S obzirom da sračunate vrednosti sleganja prevazilaze dozvoljene vrednosti od oko 2 cm, na ovoj lokaciji se radi bezbednosti preporučuje rešenje zaštite iskopa izradom betonske dijafragme duž granice iskopa koja se prostire do nepropusne podloge (laporovite gline) na koti 44.7 m. Time bi se omogućilo sniženje NPV sa manjim brojem bunara manjeg kapaciteta, a njihov uticaj ograničio većinski na zonu unutar iskopa dok bi izvan te zone nivo podzemne vode ostao skoro neporemećen, pa bi i sleganja bila zanemarljiva.



Slika 2. Prostorni raspored: (A) nivoa podzemne vode u [mm] 24 h od početka rada bunara (neporemećeni nivo je na $NPV^{(0)}=71$ mm); (B) sleganja u [mm] u istom vremenskom trenutku

Figure 2. Spatial distribution of: (A) ground water level in [masl.] 24 h after water extraction from wells (undisturbed water level is $NPV^{(0)}=71$ masl.); (B) subsidence in [mm] at the same time



Slika 3. Edomerski opit sproveden na uzorku tla iz vodonosnog sloja

Figure 3. Oedometer test applied on the soil sample from the aquifer

ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan proračun sleganja usled sniženja nivoa podzemne vode korišćenjem softvera WELL-DRAIN koji se zasniva na nelinearnom Terzaghi-jevom modelu sleganja, a koji je razvijen na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Model je prikazan na primeru iz prakse, gde je za jednu lokaciju u Beogradu, urađen proračun sleganja usled zahtevanog maksimalnog sniženja nivoa podzemne vode od 9 m. Zahtevano sniženje podrazumeva izvođenje 22 crpna bunara ukupnog kapaciteta 176 L/s koji su raspoređeni duž granice iskopa. Rezultati jasno pokazuju da usled tako značajnog sniženja, koje je neophodno jer se objekat prostire tri etaže ispod površine terena, može doći do ozbiljnijih sleganja neposredno izvan zone iskopa (7 – 9 cm u ovom slučaju). Time se evidentno povećava rizik od oštećenja okolnih objekata i infrastrukture, zbog čega je predloženo alternativno rešenje koje podrazumeva izvođenje duboke betoneske dijafragme sve do vodonepropusne podloge. Ovim rešenjem se zahtevano sniženje postiže sa manjim brojem bunara, pri čemu se njihov uticaj lokalizuje unutar zone iskopa. Opisani primer jasno ukazuje na značaj proračuna sleganja usled sniženja nivoa podzemne vode u fazi gradnje, kao i na potrebu za korišćenjem adekvatnih modela koji dovoljno tačno opisuju ovaj fizički proces.

LITERATURA:

- Budhu M., Adiyaman I. 2010: Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping, *International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34:1459-1478
- Gambolati G., Gatto P., Freeze R. A. 1973: Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 2, result, *Water Resource Research*, 10(3):563–577.
- Goorabi A., Karimi M., Yamani M., Perissin D. 2020: Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations, *Journal of Arid Environments*, 181: 104238.
- Hughes J. D., Langevin C. D., Banta E. R. 2017: Documentation for the MODFLOW 6 framework, USGS Publications Warehouse - Office of Ground Water, Report, DOI:10.3133/tm6A57
- Ritzema H.P. 1994: Drainage principles and applications, ILRI, Wageningen, Netherlands.