

SOFTVER “WELL-DRAIN” ZA PRORAČUN TRENUTNOG SLEGANJA TLA USLED SNIŽENJA NIVOA PODZEMNE VODE

Filip STANIĆ, Željko VASILIĆ, Anja RANĐELOVIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

Korišćenje bunara za sniženje nivoa podzemne vode (NPV) u fazi izgradnje objekta je standardna praksa, ali se proračun trenutnog sleganja koje nastaje kao posledica obaranje NPV često zanemaruje. Sniženje nivoa izaziva smanjenje pornog i povećanja efektivnog pritiska, što dovodi do zbivanja tla, odnosno sleganja. Ovakve deformacije su mahom trajne i mogu se opisati Terzaghijevim modelom koji pretpostavlja nelinearnu vezu između efektivnih napona i deformacija, koja je rezultat promenljive vrednosti modula stišljivosti. Pomenuti model je integrisan u softver WELL-DRAIN koji je razvijen na Institutu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Beogradu. Ovaj softver se sastoji iz dva modula, gde se prvi odnosi na proračun prostornog sniženja NPV u vremenu usled crpljenja vode iz bunara, dok se drugi odnosi na proračun posledičnog trenutnog sleganja tla korišćenjem rezultata sniženja NPV kao ulaznih podataka. WELL-DRAIN 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, WELL-DRAIN softver, Terzaghi, sniženje podzemne vode, bunari

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 12.11.2024.

Ispravljen: -

Prihvaćen: 29.11.2024.

Kontakt: fstnic@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Sleganje tla, kao posledica sniženja nivoa podzemne vode je sve aktuelniji problem, posebno u područjima gde je eksploatacija podzemnih voda intenzivna. Zbog crpljenja vode iz akvifera dolazi do opadanja nivoa podzemne vode usled čega se smanjuju porni i povećavaju efektivni pritisci u tlu, pa dolazi do njegovog zbivanja. Najveći deo ovih deformacija je trajan jer tlo nije elastičan materijal, a najbolji primer za to je Venecija gde je u periodu od 1952 do 1969. godine zbog nekontrolisane eksploatacije podzemne vode registrovano sleganje od preko 10 cm [1]. Nakon tog perioda je izvoriste zasnovano na dubokim bunarima pod pritiskom, iz kojih se Venecija delom snabdevala vodom, napušteno, što je u velikoj meri i rešilo problem. Slična situacija je i u Iranu, gde godišnja vrednost sleganja u nekim delovima dostiže i 100 mm [2]. 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. Upravo ta neravnomernost predstavlja glavnu opasnost, jer može prouzrokovati oštećenja okolnih objekata i infrastrukture.

Očigledno je da postoji potreba da se sleganje u vremenu i prostoru modelira [3], pri čemu je, u ovom slučaju, najčešće dovoljno tačno razmatrati samo vertikalne deformacije [4]. Trenutno sleganje se može modelirati primenom dva modela – jednostavnog linearnog elastičnog modela koji podrazumeva konstantnu vrednost modula stišljivosti, ili nelinearnog Terzaghijevog modela gde se vrednost modula stišljivosti menja proporcionalno promeni efektivnog napona u tlu [5, 6].

Iako modeli za simulaciju dinamike podzemnih voda već postoje [7], 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 sniženje nivoa podzemne vode, čiji rezultati predstavljaju ulazne podatke za proračun sleganja koji se sprovodi odvojeno od dinamike podzemnih voda. Time se omogućava da se proračuna sniženja NPV po potrebi sprovodi uz pomoć nekog drugog softverskog alata (npr. MODFLOW [7]). 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. 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.

2. METODOLOGIJA – proračun sleganja

Zemljište u vodonosnom sloju (akviferu) je zasićeno, odnosno olakšano u vodi i pri promeni (smanjenju) pritiska vode (porni pritisak) p [kPa=kN/m²] usled sniženja nivoa podzemne vode dolazi do promene (povećanja) efektivnog pritiska tla σ_z' [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' u slučaju akvifera sa slobodnom površinom (Slika 1), odnosno pod pritiskom (Slika 2), računa prema jednačinama (2) - gore i (2) - dole, respektivno, dok se vrednost p određuje na osnovu jednačine (3):

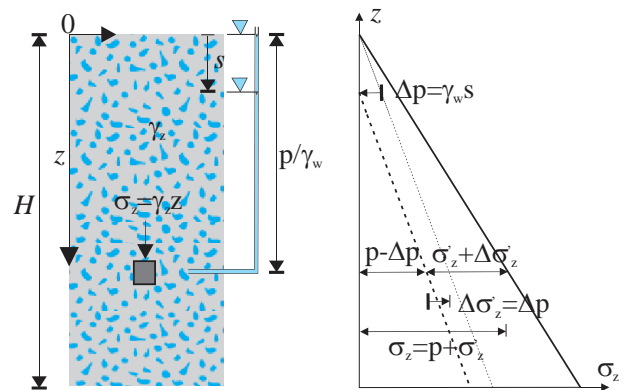
$$\sigma_z' = \begin{cases} (\gamma_z - \gamma_w)z \\ (\gamma_{z1} - \gamma_w)z_1 + (\gamma_z - \gamma_w)(z - z_1) \end{cases} \quad (2)$$

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

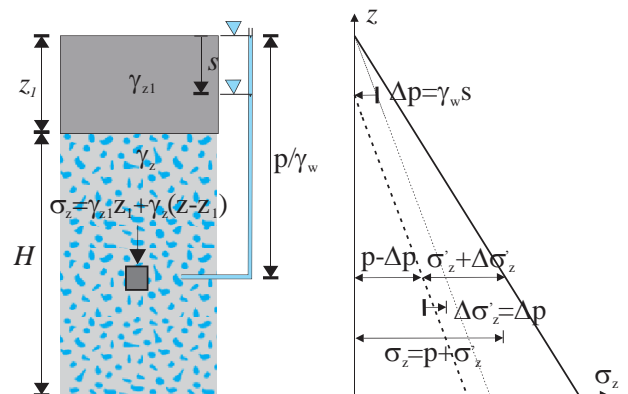
gde su γ_{z1} , γ_z i γ_w zapremisne težine zasićenog povlatnog sloja (ako je akvifer pod pritiskom), zasićenog vodonosnog sloja i vode [kN/m³]. Sa dijagrama napona na Slikama 1 i 2 (dijagram desno) se jasno vidi da usled sniženja nivoa podzemne vode dolazi do smanjenja

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 (sa desne strane) pri sniženju nivoa podzemne vode za vrednost s u vodonosnom sloju sa slobodnom površinom (sa leve strane)



Slika 2. Naponi u tlu (sa desne strane) pri sniženju nivoa podzemne vode za vrednost s u vodonosnom sloju pod pritiskom (sa leve strane)

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 [5, 6]. 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 :

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

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 deformacija pri naponima manjim od σ_{zc}' (videti Sliku 3). Terzaghi-jev model (jednačina 8) 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:

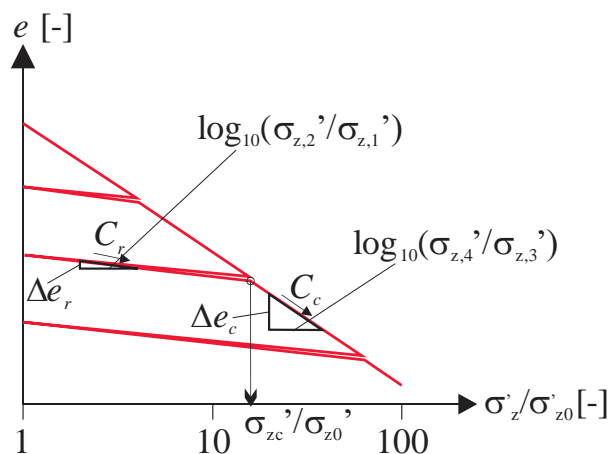
- kada se ponovno opterećenje u potpunosti odvija u oblasti koja je manja od napona prekonsolidacije: $\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z' < \sigma_{zc}'$ (jednačina 8 gore)
- kada se ponovno opterećenje delimično odvija u zoni rekompresije a delimično u zoni napona koji su veći od napona prekonsolidacije: $\sigma_{z0}' \leq \sigma_{zc}'$ & $\sigma_{z0}'+\Delta\sigma_z' > \sigma_{zc}'$ (jednačina 8 sredina)
- kada se povećanje $\Delta\sigma_z'$ odvija u potpunosti u zoni napona koji su veći od napona prekonsolidacije: $\sigma_{z0}' > \sigma_{zc}'$ (jednačina 8 dole)

Koeficijenti C_c i C_r se određuju na osnovu Edometarskog opita stepenastim opterećenjem (promena koeficijenta poroznosti pri različitim vertikalnim naponima – Slika 3) 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 $\Delta\sigma_z'$).



Slika 3. Određivanje koeficijenata kompresije C_c (jednačina 9) i rekompresije C_r (jednačina 10) na osnovu rezultata Edometarskog opita stepenastim opterećenjem i rasterećenjem

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 .

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] (Slike 1 i 2 levo). 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.

3. WELL-DRAIN softver

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 x - y 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. Kao što je već pomenuto, softver WELL-DRAIN zanemaruje uticaj sleganja, odnosno zbijanja, na hidrauličke karakteristike krupnozrnog zemljišta od kojeg je najčešće sačinjen vodonosni sloj, zbog čega se proračun sniženja NPV sprovodi nezavisno od proračuna sleganja. Po potrebi, vrednosti sniženja mogu se odrediti i uz pomoć nekog drugog softverskog alata (npr. MODFLOW [7]), a zatim iskoristiti kao ulazni podatak za proračun posledičnog trenutnog sleganja $\delta(x,y,t)$ po prethodno opisanoj metodologiji.

U sklopu prvog modula WELL-DRAIN softvera koji se odnosi na proračun sniženja NPV koristi se Hantush-ijevo analitičko rešenje [8, 9], odnosno Theis-ovo rešenje [10] kao njegov specijalni slučaj:

$$s(r, t) = \sum_j \sum_i \frac{AQ_{ji}}{4\pi T} w\left(\frac{r_j^2 S_e}{4T(t-t_i)}, \frac{r_j}{\lambda}\right) \quad (12)$$

gde je j redni broj bunara iz kojeg se crpi protok Q_{ji} čiji se intenzitet menja u trenucima t_i , $r_j = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}$ je rastojanje računске tačke od bunara j (x i y su koordinate računске tačke u horizontalnoj ravni, dok su x_j i y_j koordinate bunara j), w je Hantush-ijeva bezdimenzionalna funkcija [-] koja zavisi od hidrauličkih karakteristika vodonosnog sloja (transmisivnost T [m^2/s] i specifična izdašnost S_e [-]), i povlatnog sloja koji se nalazi iznad (koeficijent

procurivanja $\lambda = \sqrt{T \frac{b}{k}}$ [m] koji zavisi od koeficijenta filtracije povlatnog sloja k [m/s] i njegove debljine b [m]). U slučaju slabopropusnog povlatnog sloja (mala vrednost parametra k , odnosno velika vrednost λ), jednačina (12) se svodi na Theis-ovo rešenje. Primenom principa superpozicije u vremenu (t) i prostoru (x, y), jednačina (12) daje rezultate prostornog sniženja nivoa podzemne vode u trenutku t , koji se zatim koriste za proračun prostornog sleganja u vremenu - $\delta(x,y,t)$.

3. REZULTATI

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. 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.

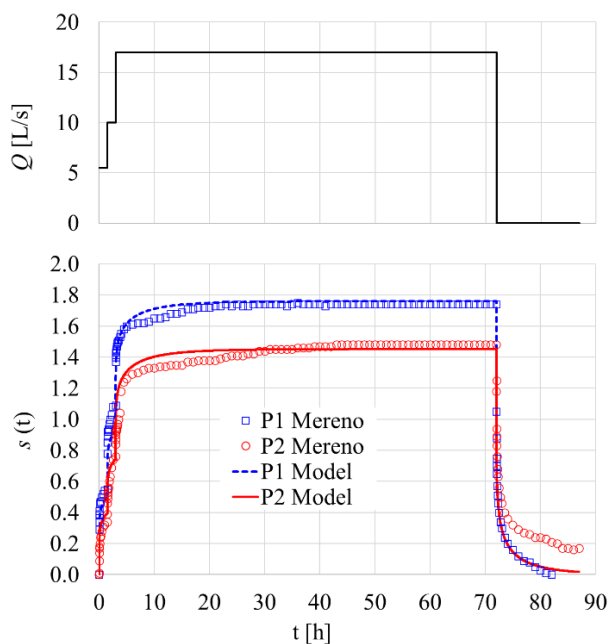
Tabela 1. Usvojeni geološki profil na lokaciji za koju je sproveden proračun sleganja

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

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 i njihovih protoka neophodne i hidrauličke karakteristike vodonosnog i povlatnog sloja (T , S_e i λ) koje su određene na osnovu sprovedenog testa probnog crpljenja. Na Slici 4 su prikazani rezultati testa, gde su na gornjem grafiku protoci $Q(t)$ koji se crpe iz opitnog

bunara, dok su na donjem grafiku posledične vrednosti sniženja NPV u vremenu t izmerene u piježometrima P1 i P2 na rastojanjima 5.6 i 14.7 m od opitnog bunara (prazni krugovi i kvadrati).

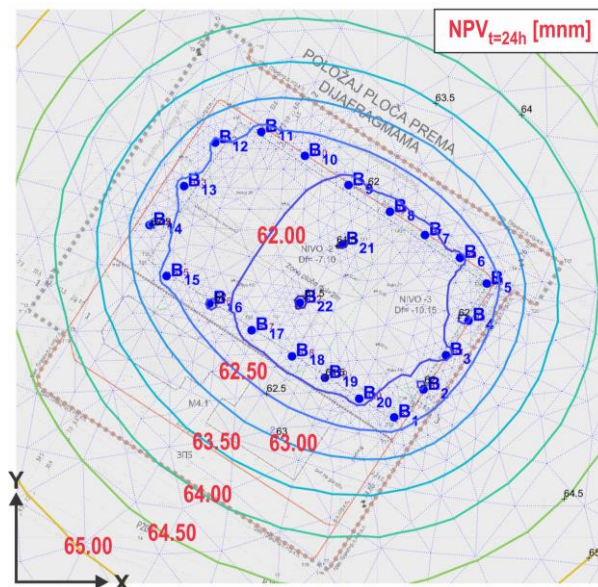
Kako bi se odredile hidrauličke karakteristike vodonosnog i povlatnog sloja, nepoznati parametri jednačine (12) se podešavaju tako da se ostvari što bolje sleganje sa vrednostima sniženja izmerenim u piježometrima P1 i P2. Kao rezultat je dobijena relativno mala vrednost specifične izdašnosti $S_e = 1 \times 10^{-4}$, koja ukazuje na to da se radi o akviferu pod pritiskom, kao i relativno velika vrednost transmisivnosti $T = 0.0087 \text{ m}^2/\text{s}$ (odnosno koeficijenta filtracije $K_f = T/H \approx 4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$), čime se potvrđuje da je vodonosni sloj sačinjen od peska i šljunka. Takođe, vrednost parametra $\lambda = 1250 \text{ m}$ ukazuje na nezanemarljivo procurivanje iz gornjeg povlatnog sloja, sačinjenog od sitnog prašinstog peska, iz kojeg se prihranjuje vodonosni sloj.



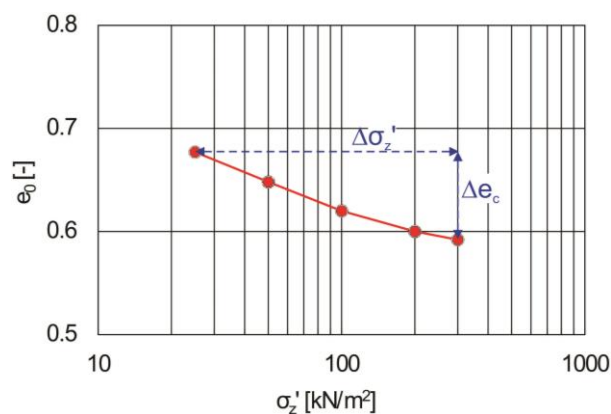
Slika 4. Rezultati testa probnog crpljenja sprovedeni na lokaciji. Gore – protoci koji se crpe iz opitnog bunara; Dole – poređenje izmerenih (simboli) i sračunatih vrednosti (linije) posledičnog sniženja u piježometrima P1 i P2.

Na Slici 5 su prikazani rezultati proračuna dinamike nivoa podzemnih voda sprovedenog uz pomoć WELL-DRAIN softvera. Prikazane izololinije 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 $NPV(0) = 71.00 \text{ mm}$.



Slika 5. Prostorni raspored nivoa podzemne vode u [mm] 24 h od početka rada bunara (neporemećeni nivo je na $NPV(0)=71 \text{ mm}$)

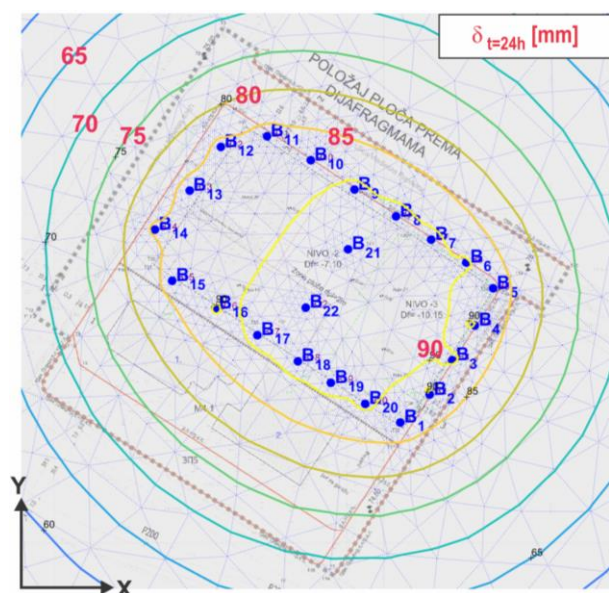


Slika 6. Edometarski opit sproveden na uzorku tla iz vodonosnog sloja

Pored sračunatih vrednosti $s(x,y,t=24h)$, za proračun sleganja Terzaghi-jevim 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 6, 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 na osnovu literature [5] 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, $\sigma_{z0} \approx 200 \text{ kN/m}^2$.

Konačno, kada su određene vrednosti svih ulaznih parametara moguće je sračunati vrednosti sleganja u vremenu uz pomoć WELL-DRAIN softvera. Na Slici 7 su prikazane izolinije sa istim vrednostima sleganja, nakon 24 h od početka rada bunara.



Slika 7. Prostorni raspored sleganja tla u [mm] 24 h od početka rada bunara

Na Slici 5 je prikazano da projektovani sistem bunara može obezbediti zahtevano sniženje nivoa podzemnih voda od 9 m u zoni iskopa (kota 62 mnm), ali i da dolazi do značajnog sniženja od 7-8 m neposredno izvan zone iskopa (kote između 63 mnm i 64 mnm). Posledično, izvan zone iskopa su sračunata i značajnija sleganja, koja iznose između 7 i 9 cm (Slika 7), 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.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan proračun sleganja usled sniženja nivoa podzemne vode korišćenjem softvera WELL-DRAIN koji je razvijen na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Softver se sastoji od dva modula, gde se prvi odnosi na proračun sniženja nivoa podzemne vode uz pomoć vertikalne drenaže, dok se drugi odnosi na proračun posledičnog trenutnog sleganja tla. Moduli funkcionišu nezavisno pod pretpostavkom da zbijanje tla ne utiče značajno na vodoprovodljivost vodonosnog sloja. Posledično, kao ulazne podatke za proračun trenutnog sleganja moguće je koristiti i rezultate prostornog sniženja NPV dobijene uz pomoć drugih softverskih alata. U sklopu WELL-DRAIN softvera sniženje NPV se računa uz pomoć Hantush-ijevog analitičkog rešenja, dok se za proračun trenutnog sleganja koristi nelinearni Terzaghi-jev model.

Opisani softver prmenjen je 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 betonske 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

- [1] Gambolati G., P. Gatto, R.A. Freeze, "Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 2, result", Water Resource Research, vol. 10, no. 3, pp. 563–577, 1973.

- [2] Goorabi A., M. Karimi, M. Yamani, D. Perissin, "Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations", *Journal of Arid Environments*, vol. 181, 2020.
- [3] Budhu M., I. Adiyaman, "Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping", *International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 34, pp. 1459-1478, 2010.
- [4] Ritzema H.P., "Drainage principles and applications", ILRI, Wageningen, Netherlands, 1994.
- [5] Verruijt A., "Soil Mechanics", Delft University of Technology, 2012.
- [6] Maksimović M., "Mehanika tla – četvrto izdanje", AGM knjiga doo, 2008.
- [7] Hughes J. D., C. D. Langevin, E. R. Banta, "Documentation for the MODFLOW 6 framework", USGS Publications Warehouse - Office of Ground Water, Report, DOI:10.3133/tm6A57, 2017.
- [8] Hantush M.S. and C.E. Jacob, "Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer", *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 36, no. 1, pp. 95-100, 1955.
- [9] Hantush M.S., "Hydraulics of wells, in: *Advances in Hydrosience*", Academic Press, New York, pp. 281-442, 1964.
- [10] Theis C.V., "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage", *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 16, pp. 519-524, 1935.

SOFTWARE "WELL-DRAIN" FOR CALCULATING THE SOIL SUBSIDENCE DUE TO LOWERING OF THE GROUNDWATER LEVEL

by

Filip STANIĆ, Željko VASILIĆ, Anja RANĐELOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

The use of pumping wells to lower groundwater during the construction phase is standard practice worldwide, but the calculation of the consequent soil subsidence is often neglected. The groundwater lowering causes a decrease in pore pressure and an increase in effective stress, leading to soil compaction and subsidence. These deformations are mostly permanent and can be described using Terzaghi's model which assumes nonlinear correlation between the effective stress in the soil and deformations, because of the non-constant value of the compressibility module. This model is integrated into the WELL-DRAIN software, developed at the University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering. This software contains two modules, where the first one is related to the calculation of the spatial lowering of groundwater in time due to water extraction from wells, while the second one

is related to the computation of the consequent soil subsidence while using the groundwater lowering results as an input. WELL-DRAIN 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 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, WELL-DRAIN software, Terzaghi, lowering groundwater level, wells