

ГЕОТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМИ УСЉЕД ДЕЈСТВА ПОДЗЕМНИХ ВОДА

Бојана Грујић,¹
Жарко Грујић,²
Саша Татар³

УДК: 550.82 : 556.32

DOI: 10.14415/zbornikGFS29.05

Резиме: *Полазећи од основног погледа на главни проблем који настаје усљед хидро-геомеханичких процеса, посебно покретачке силе која је изазвана промјеном притиска у подземној води у овом раду ће се дати приказ процјене напрезања или деформације у тлу (тло и стијена). Рјешење представљају комбинације система једначина тла и протока подземних вода и насталих геотехничких напрезања или проблема који се јављају у тлу. У раду ће се описати проблем слијегања тла због црпљења воде у отвореном коп-подручју и проблеми процјене процједне снаге у засићеним или незасићеним лошим материјалима.*

Кључне ријечи: *хидро-геомеханички процеси, подземне воде, ефективни напон, деформација тла, слијегање тла*

1. УВОД У ХИДРО-ГЕОМЕХАНИЧКЕ ПРОЦЕСЕ

Хидро-геомеханичке процесе можемо посматрати на микроскопском и макроскопском нивоу. Када говоримо о микроскопском нивоу, то су двије фазе, чврсти материјал и течност, која тече међусобно повезаним, мрежним каналима, кроз порозни и испуцали чврсти материјал. То су дакле два одвојена система, која дјелују један у комбинацији са другим.

У средишту нашег интереса је проблем стабилности чврстог скелета и транспорт ситних чврстих честица кроз костур тла. Основни концепт је подјела чврстог материјала на костур који преноси ефективне напоне и на fine чврсте честице које то не преносе. Најинтересантнији процеси су:

- Хемијско распадање костура тла ако чврсте материје нису у термодинамичкој равнотежи са чврстим минералима (од великог значаја код кречњака)
- Хидродинамичка суфозија, зачепљење, (пролаз или блокирање чврстих материјала који нису дио костура- приликом изградње филтера)

¹ мр, Бојана Грујић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет у Бањој Луци, Степе Степановића 77/3, Бања Лука, Република Српска, е – mail: bgrujic@agfbl.org

² Жарко Грујић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет у Бањој Луци, Степе Степановића 77/3, Бања Лука, Република Српска, е – mail: zgrujic@agfbl.org

³ Саша Татар, дипл.инж. грађ., е – mail: statar@agfbl.org

- Унутрашња ерозија (цјевовода или појава „кључања“ пијеска)

На макроскопском нивоу хидро-геомеханички процеси се сматрају проблемом механике континуума, односно чврстог материјала и флуида који тече. То су двије компоненте које продиру једна у другу и испуњава се цијела запремина. Дакле, густина масе сваке компоненте представљаће заједно укупну густину.

Веома важни локални проблеми који настају усљед хидро-геомеханичких процеса, на макроскопском нивоу су:

- Локална деструкција, гдје градијент пијезометарске главе прелази вриједност ефективних напона – стварање живог пијеска
- Локална деструкција слијегања на површини падине непосредно изнад непропусног или полупропусног слоја

Најважнији глобални проблеми, који такође могу бити третирани као и локални проблеми су:

- Проблеми слијегања усљед еластичних и пластичних деформација
- Клизање и слом геотехничких конструкција
- Вискозно течење тла (у зонама депонија и током пораста нивоа подземних вода, посебно у близини остатака рудника са порастом водостаја) [1]

2. ПОКРЕТАЧКЕ СИЛЕ ЗА ХИДРО-ГЕОМЕХАНИЧКЕ ПРОЦЕСЕ

Снага покретачке силе у хидро-геомеханичким процесима који узрокују деформабилност, деструкцију или колапс тла је прије свега функција хемијске снаге, хидромеханичког убрзања као и промјене притисака подземних вода. Хемијска снага силе пропорционална је одступању индекса засићења SI од 1,0 ($F=SI-1,0$).

Хидромеханичко убрзање силе F слиједи Њутнов закон протока у каналу [2]:

$$F = dV / dt = \rho_{(F)} (\partial V / \partial t + V \partial V / \partial l) \quad (1)$$

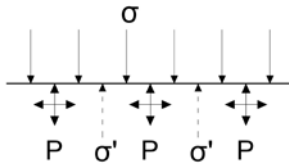
Изнад свега, други члан хидродинамичког убрзања је одговоран за транспорт чврстих честица кроз канале или пукотине скелета. Претпоставимо да су геометријски услови суфозије испуњени претходном једначином (1),

$$\Phi_{(честице)} < SF \cdot \Phi_{(канала)}$$

SF - фактор клизања у зависности од врсте канала

транспорт честица одвија се само ако $V \partial V / \partial l$ прелази процијењену вриједност у зависности од облика и тежине честица и правца транспорта.

Притисак воде у тлу је повезан са тоталним напонам у тлу (σ) и ефективним напонам у тлу (σ'):



$$\sigma = \sigma' + p, \quad (2)$$

σ , σ' , p – интензивне варијације континуума механике
Ако је тотални напон σ константан, тј. нема промјене оптерећења током изградње нове конструкције или ископа у тлу, промјене ефективног напона преносе се преко скелета тла и једнаке су промјени подземног притиска воде.

$$d\sigma = 0 ; d\sigma' = -dp \quad (3)$$

Ефективни напон је комбинован са напрезањем:

$$d\bar{\varepsilon} = (C') d\bar{\sigma}' = -(C') dp \quad (4)$$

$d\bar{\varepsilon}$, $d\bar{\sigma}'$ – вектори напрезања ефективног напона

(C') – матрица деформабилности

Слијегање тла је окарактерисано промјеном притиска p у времену због кретања подземне воде:

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) dt \quad (5)$$

Проблеми често настају усљед промјене оптерећења p у простору (стабилно стање подземних токова воде).

$$dp = \gamma d\bar{l} \text{ grad}(p / \gamma + z) = \gamma d\bar{l} \text{ grad} h \quad (6)$$

гдје је:

- h – висина нивоа пијезометра
- γ – јединица тежине флуида
- $d\bar{l}$ – инфинитезимална дужина у правцу од градијента h

Сила процјеђивања ΔS ,

$$\Delta S = \gamma d\bar{l} dA \text{ grad} h = \gamma \Delta V \text{ grad} h, \quad (7)$$

дјелује на чврсти скелет као реакција сили трења флуида који тече кроз тло (1).

dA – инфинитезимална површина управна на $d\vec{l}$

Клизање косина углавном настају због промјене оптерећења p у времену. Одговорност за стабилност од проклизавања повјерена је ефективном напону у просторној тачки:

$$\tau = c + \sigma n' \operatorname{tg} \Phi \quad (8)$$

- c – фактор кохезије
- Φ – угао унутрашњег трења

Свака редукција σ због повећања оптерећења p (нпр за вријеме пораста подземних вода у напуштеним рудницима) доводи до смањења напона смицања и доводи до опасности од клизања.

3. СЛИЈЕГАЊЕ ТЛА

Слијегање тла је окарактерисано великим бројем параметара а један од важних је свакако ниво подземне воде. За процјену најзанимљивијих вертикалних слијегања потребно је превасходно пронаћи дистрибуцију притисака $p = p(x, y, z, t)$. За ово је потребно ријешити парцијалне диференцијалне једначине које повезују математички модел кретања подземних вода са математичким моделима еластичне и пластичне консолидације [3].

$$\left[\begin{array}{l} \text{Течење подземне воде,} \\ \text{укључује} \\ \text{изворе резервоаре,} \\ \text{услове за црпљење,} \\ \text{слободне дренаже} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Извори, резервоари} \\ \text{појмови за еластични дио} \\ \text{консолидације} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Извори, резервоари} \\ \text{појмови за пластични дио} \\ \text{консолидације} \end{array} \right]$$

$$\nabla \frac{K}{\rho g} \Delta p^* + \Sigma W = (\alpha_1 + n\beta) \partial p / \partial t + \frac{1}{q^* \int_0^{\tau} \rho^*} (\tau) \exp[] d\tau$$

- β - коефицијент стишљивости воде

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p}$$

- n – порозност
- ρ - густина воде
- α_1, α_2 – еластична и пластична стишљивост тла

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 \pm n} \frac{\partial n}{\partial p}$$

$$\alpha_2 = - \frac{d\varepsilon}{d\sigma'}$$

- k - хидродинамичка проводљивост (Darsi-јев закон)
- q^* - вискозност земљишта (пластични дио консолидације)
- [] – $-(t - \tau) / \alpha_2 q^*$

Проблеми слијегања посебно се јављају у напуштеним рударским подручјима, када се ниво подземне воде врати у првобитне вриједности прије црпљења. Пластични дио деформације за вријеме мињања у рудницима и црпљења често је у истом опсегу у зависности од врсте стијена или земљишта.

4. СТАБИЛНОСТ КОСИНА У ЛОШИМ СТИЈЕНАМА И ПРОЦЈЕЂИВАЊЕ ВОДЕ КРОЗ ТЛУ

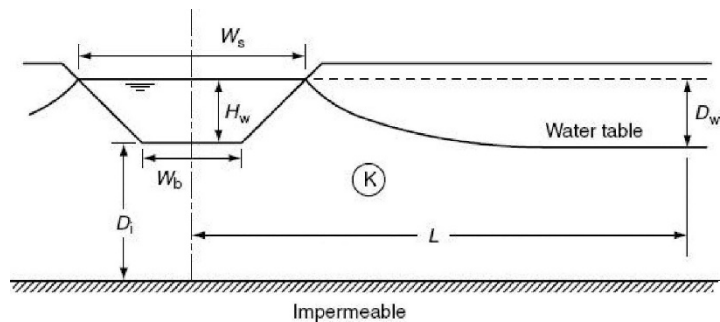
Струјање подземне воде дјелује као покретачка сила на клизање косина и падина, посебно у тлу или стијени лоших геотехничких карактеристика. Већина прорачуна подземних вода, посебно у мулти-издан системима се одвија на основу Dupuit-ових претпоставки. За неке проблеме 2D тока, једна компонента тока може се занемарити у односу на другу (нпр у једноаксијалним токовима са слободном површином, вертикална компонента тока може бити занемарена). Ово је пионирска претпоставка Dupuit-а (1836. год), коју је касније користио и Forchheimer (1930), позната као Dupuit-Forchheimer претпоставка. Ова претпоставка даје разумна и прихватљива рјешења када је релативно плитка дубина тока и нагиб слободне површине је такође занемарљив. Ове претпоставке се могу приказати у следећој форми [4]:

- Проток је хоризонталан у свим вертикалним пресецима
- Брзина је константна по дубини
- Брзина се рачуна помоћу нагиба слободне површине (хидраулички градијент)
- Нагиб воденог стола је релативно мали

Процјеђивање из отворених канала

Dupuit-Forchheimer претпоставке могу се користити за анализу отворених канала уграђених у хомогеном тлу, знатно ниже водопропустљивости (у анализи се претпоставља као непропусна подлога). Просјечан нагиб стола воде се рачуна из следећег обрасца [5]:

$$D_w / (L - 0.5W_s)$$



Слика 1. Процеђивање из канала са непропусном подлогом [7]

Специфични проток је окарактерисан Дарси-јевим законом као:

$$q = KD_w / (L - 0.5W_s)$$

Просјечна дубина тока је:

$$D + H_w - 0.5D_w$$

Укупни проток по јединици дужине канала на обје стране је:

$$Q = 2KD_w \frac{D_i + H_w - 0.5D_w}{L - 0.5W_s} \quad (9)$$

Процеђивање кроз затворени аквифер

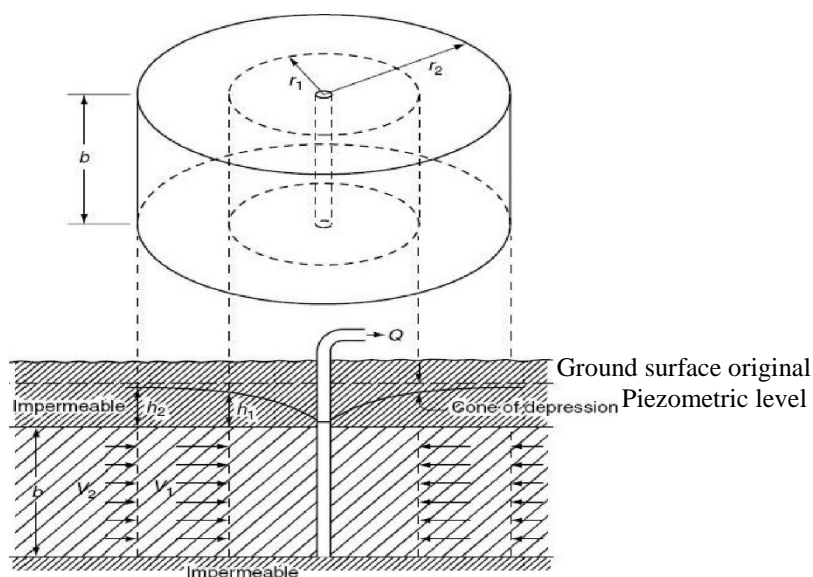
Када посматрамо један ограничен водоносни слоји са хидрауличком водопрпусношћу K , претпоставља се да ће почетни пијезометарски ниво бити хоризонталан, тако да нема кретања подземне воде. Кад се вода црпи, долази до спуштања пијезометарске линије и ствара се пад.

Ако разматрамо и два имагинарна цилиндра полупречника r_1 и r_2 , токови кроз сваки од ових цилиндара висине b су хоризонтални. Проток мора бити једнак [6] :

$$Q = 2\pi r_1 b K i_1 = 2\pi r_2 b K i_2, \quad (10)$$

гдје је:

- r_1, r_2 – пречници цилиндра, $r_1 > r_2$
- i_1, i_2 , - хидраулички градијент; $i_1 > i_2$
- $2\pi b K = \text{const}$



Слика 2. Проток у затвореном аквиферу [7]

5. ЗАКЉУЧАК

Практична примјена описаних принципа течења воде у тлу сусреће се код различитих грађевинских објеката који су у контакту са водом. То се прије свега односи на прорачун процеђивања кроз земљане бране, дренарање конструкција у додиру са водом, дренарање саобраћајница и слично. Прорачун је прихватљив онолико колико су тачни улазни подаци. У новије вријеме 3D моделирање течења подземних вода је постао веома популаран хидро-геолошки проблем и изазов. Стварање 3D модела праћено је прикупљањем геолошких и хидро-геолошких података, формирањем граница и могућих грешака. Модели представљају просторни распоред геологије као и водних ресурса у издани у оквиру модел - домена. Свакако, требало би нагласити да су принципи 3D моделовања између осталог засновани на поставкама и једначинама које су приказане у оквиру овог рада.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Freeze, A.R. And Cheery, J.A., Groundwater, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 07632, p.604 (1979)
- [2] Buch, K.F. and Luckner, L., Geohidraulik (Geohydraulic), Leipzig 1973.
- [3] Cedegren, H.R. Seepage, Drainage and Flow Nets, New York, p.489
- [4] Handy R.L.&Spanger M.G. : Geotechnical Engineering - Soil and Foundation Principles and Practice, McGraw Hill, 2007. Fifth Edition

- [5] Terzaghi K., Peck, R.B., and Mesri G. : Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, **1996**
- [6] Bouwer, H. **1969**. Theory of seepage from open channels, in Advances in Hydroscience, Vol. 5, pp. 121-172, Ven Te Chow, Ed., Academic Press, New York.
- [7] Saquib, M.N., Davis, L.C., Khan, A.Q., and Taghavi, S.A. **1995**. Imperial county groundwater evaluation: model applications, in Proceedings of the 22nd Annual Conference on Integrated Water Resources for the 21st Century, Cambridge, MA, May 7-11, M.F. Domenica, ed., ASCE, Reston, VA, pp. 929-932.

GEOTECHNICAL PROBLEMS THAT OCCUR DUE TO THE FACT OF GROUNDWATER

***Summary:** Beginning from the basic views on the main problem that occurs due to hydro-geomechanical processes, in particular the driving force caused by changing the pressure of groundwater, this paper will provide a review of the assessment of stresses and strains in the soil (soil and rock). The solution is a combination of the system of equations of the soil and ground water flow and caused geotechnical stresses or problems that occur in the soil. The paper will describe in detail the problem of subsidence due to pumping of water in the open pit-field problems and assessment of seepage forces in saturated or unsaturated loose materials.*

***Keywords:** hydro-geo-mechanical processes, groundwater, effective stress, deformation of the soil, soil subsidence*