

# Száraz sűrűség meghatározása mérnökgeofizikai szondázási adatok statisztikus feldolgozásával

DR. SZABÓ NORBERT PÉTER okl. geofizikus mérnök, Geofizikai és Térinformatikai Intézet, Geofizikai Tanszék, Miskolci Egyetem, KAVANDA RÉKA okl. környezetgeofizikus mérnök DACHS GmbH



*Felszínközeli szerkezetek kutatása során a száraz sűrűség meghatározása alapvető geotechnikai feladat. A jelenleg alkalmazott módszerekkel a mérési terület egy-egy pontjában áll információ a rendelkezésünkre. A cikkben bemutatott statisztikai eljárással folytonos és in-situ információt kaphatunk a fenti mennyiség területi eloszlásáról. A száraz sűrűség a közetsűrűséggel, porozitással és agyagtartalommal áll kapcsolatban, melyet mérnökgeofizikai szondázási adatokból direkt (determinisztikus) módon határozhatunk meg. E paramétereken kívül még szükséges a víztelítettség ismerete, melyet az összes szelvénytípus együttes faktor analízisével határozunk meg. Az esettanulmány egy hazai területen 12 fúrásra vonatkozóan megadja a száraz sűrűség 2D eloszlását és egy lokális regressziós összefüggést közöl a mért közetsűrűség és a száraz sűrűség között.*

## Elméleti áttekintés

Felszínközeli szerkezetek földtani/geofizikai vizsgálata során a felszíni geofizikai módszerek hatékonyan alkalmazhatók [10], melyeket gyakran kombinálnak fúrólukban végzett geofizikai mérésekkel. A mérnöki és környezetvédelmi feladatok megoldása céljából felhasznált fúrólukszelvények részletes in-situ információt szolgáltatnak a porozitásról, víztelítettségéről, agyagtartalomról és a kőzetösszetételről. Ezek közül néhány kőzetfizikai paraméter kapcsolatba hozható bizonyos nem mérhető geotechnikai paraméterekkel. A nyírószilárdságot, térfogati rugalmasságot és a permeabilitást nagymértékben befolyásolja a talaj/kőzet sűrűségének és víztelítettségének megváltozása [8]. E kapcsolatok felfedezése nagyban segíti a talaj/kőzet minőségének, mechanikai és hidrogeológiai állapotának a felmérését.

A konszolidálatlan összeletek néhány geotechnikai szempontból lényeges fizikai tulajdonsága CPT (Cone Penetration Test) szondázással in-situ mérhető [7]. A mérés során a talajba hidraulikus berendezés és rudazat segítségével jutott kup csúcscellenállása és palástsúrlódása mérhető, melyből következtetni lehet a talaj/kőzet típusára és feszültség állapotára. A talajok/kőzetek kompaktiója és nyírószilárdsága nagymértékben függ a száraz sűrűségtől, ami kapcsolatba hozható a közetsűrűséggel és a víztartalommal. A legkorszerűbb mérési módszer, mellyel a két utóbbi mennyiség helyben meghatározható, a mérnökgeofizikai szondázás (MGSZ) [3]. Az MGSZ-al ugyanazon kőzetfizikai paraméterek mérhetőek, mint a nyitott lyukban alkalmazott mélyfúrás geofizikai szondákkal. Az adatok feldolgozása determinisztikus vagy inverziós módszerekkel történhet. Az előbbi a kőzetfizika paramétereit több lépésben, külön-külön származtatja [9], míg az utóbbi az összes szelvényadatot egyetlen eljárásban dolgozza fel. Az MGSZ adatok inverziójára *Drahoš* [2] vezetett be a súlyozott legkisebb négyzetek elvén alapuló megoldást, mely mélységpontként határozza meg a modell paramétereinek értékét és azok becslési hibáját.

A faktor analízis a többváltozós statisztika egyik hatékony feltáró módszere [6], mely nagyméretű (többváltozós) problémák változószámának a csökkentésére és nem mérhető háttérváltozók meghatározására alkalmas. A mélyfúrás geofizikai gyakorlatban a szerző korábban az agyagtartalom becslésére alkalmazta [11]. Jelen tanulmányban az MGSZ adatok faktor analízisével származtatjuk a talajok/kőzetek víztelítettségét. Ennek elvi alapjait egy korábbi cikk tartalmazza [12]. A víztelítettség ismeretében lehetőség nyílik a száraz sűrűség területi eloszlásának meghatározására.

## Száraz sűrűség származtatása

Felszínközeli üledékek kőzetfizikai modelljében elkülönítjük a finom szemcsés agyagos alkotórészek térfogatát ( $V_d$ ) a durva szemcsék alkotta kőzetmátrix térfogatától ( $V_m$ ), valamint a pórúrtól, melyet levegő ( $V_g$ ) és/vagy víz ( $V_w$ ) tölt ki. A mátrix tartalmazza a cementáló anyagot és a szerves alkotórészeket is. A fenti modell anyagmérleg egyenlete a következő:

$$V_m + V_d + V_w + V_g = 1 \quad (1)$$

A porozitás az (1) egyenlet alapján  $\Phi = V_w + V_g$ , mellyel a víztelítettség  $S_w = V_w / \Phi$ . A talajmechanikában definiált víztartalom ( $w$ ) a fenti kőzetfizikai paraméterekkel kifejezve

$$w = \frac{\rho_w V_w}{\rho_m V_m} = \frac{S_w \Phi}{\rho_m (1 - \Phi - V_d)}, \quad (2)$$

ahol  $\rho_w$  és  $\rho_m$  az édesvíz és a szilárd alkotórész térfogatsűrűsége ( $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ ). A (2) egyenletben szereplő porozitás a sűrűség szonda válaszfüggvényéből kifejezhető

$$\Phi = \frac{\text{DEN} - V_d \rho_d - \rho_m (1 - V_d)}{\rho_w S_w - \rho_m}, \quad (3)$$

ahol DEN (g/cm<sup>3</sup>) a penetrációs szondával mért közetsűrűség,  $\rho_c$  az agyag térfogatsűrűsége. A kvarc és az agyag sűrűsége irodalom alapján vagy a kutatási területről származó előzetes ismeretek alapján megadható. A (2) egyenletben szükség van az agyagtartalom ismeretére, melyet a természetes gamma intenzitás (GR) mérés alapján megadhatunk

$$V_d = 0.083 \left( 2^{\frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}} - 1 \right) \quad (4)$$

ahol  $GR_{min}$  és  $GR_{max}$  a GR (beütés/perc) szelvény minimális és maximális értéke [5]. A száraz sűrűség kapcsolatba hozható a mért közetsűrűséggel [8] és a (2) egyenletben szereplő víztartalommal

$$\rho_d = \frac{DEN}{(1+w)} \quad (5)$$

melyben minden mennyiség MGSZ adatokból meghatározható.

#### Víztelítettség meghatározása faktor analízis alkalmazásával

A statisztikai eljárás bemenő adatait az MGSZ szelvényadatok képezik, melyeket egy adatmátrixba (D) gyűjtünk össze. A  $D_{ij}$  elem képviseli a j-edik szonda által az i-edik mélységpontban mért adatot. A D mátrixban szereplő, különböző fizikai elveken mért mennyiségeket először standardizáljuk, majd az adatmátrixot felbontjuk

$$D = FL^T + E \quad (6)$$

ahol F a faktor analízissel származtatott új változók (faktorok)  $N \times a$  méretű mátrixa, L az  $M \times a$  méretű faktorsúly mátrix (N a szelvényezett mélységintervallumon mért pontok száma, M az alkalmazott szondák száma, T a transzponálás jelölése). A faktor mátrix egy-egy oszlopában található elemek képezik az új változók szelvényeit. A faktor súlyok a mért változók és a faktorok korrelációs viszonyait fejezik ki. A faktorok száma (a) a mért változók számának redukálása következtében kisebb M-nél. A (6) egyenletben az  $N \times M$  méretű E mátrix a hibát képviseli. A standardizált adatok korrelációs mátrixa lineáris független faktorok esetén felírható a faktorsúlyokkal, melyek sajátérték feladat megoldásával meghatározhatók [4]. A faktorsúlyok ismeretében a faktorok előállíthatók a Maximum Likelihood módszerrel, ahol az alábbi likelihood függvényt (P) optimalizáljuk

$$P = -(D - FL^T)^T \Psi^{-1} (D - FL^T) = \max \quad (7)$$

ahol  $\Psi$  a hibavariancia mátrix, melynek elemei a mért változók szórásnégyzeteinek a közös faktorokkal nem értelmezhető részét képviselik. A (7) egyenlet megoldása [1]

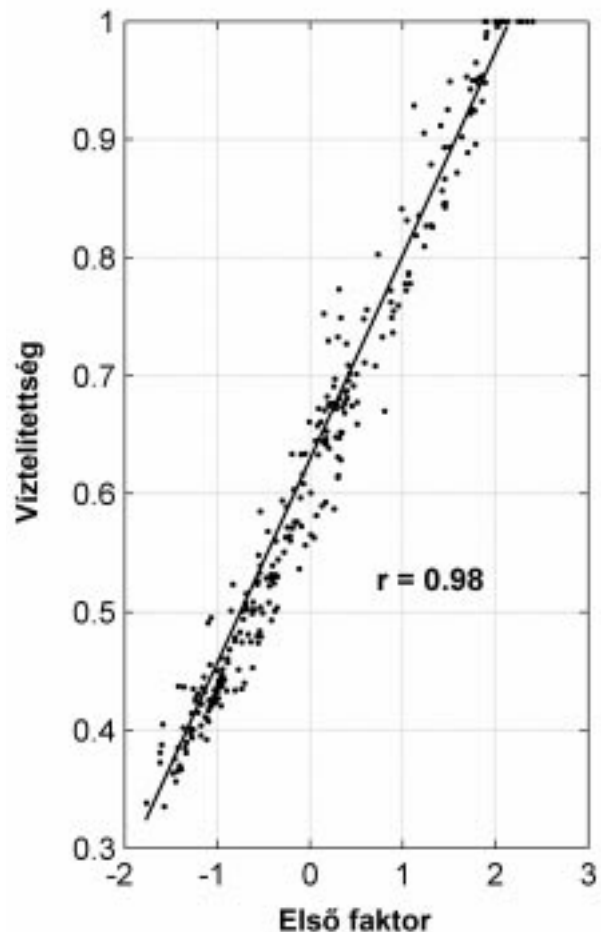
$$F = (L^T \Psi^{-1} L)^{-1} L^T \Psi^{-1} D \quad (8)$$

Az eredményül adódó faktorokat gyakran ortogonális transzformációnak (forgatás) vetjük alá, mellyel szemléletesebb fizikai jelentést tulajdoníthatunk nekik. Végeredményben minden faktor egy-egy új szelvény képvisel, melyek tapasztalati úton kapcsolatba hozhatók a mérési környezet közzefizikai jellemzőivel.

Az MGSZ adatok feldolgozásából származó első faktor (F mátrix első oszlopa) erős lineáris kapcsolatot mutat a víztelítettséggel [12]. A Pearson-féle korrelációs együttható (r) értéke az eddigi vizsgálatok során átlagosan 0.95-nak adódott. Az 1. ábra egy tipikus faktor-víztelítettség függvénykapcsolatot mutat. E kapcsolat leírására egy egyszerű lineáris formulát használhatunk

$$S_w = \frac{F_1 - F_{1,min}}{F_{1,max} - F_{1,min}} \quad (9)$$

ahol  $F_1$  az első faktor becült értéke a mélységpontban,  $F_{1,min}$  és  $F_{1,max}$  az első faktor szelvény szélsőértékei. Mivel a (9) egyenlet nem tartalmaz fizikai jellegű ismereteket a fenti formula jó közelítéssel a mérési területtől függetlenül alkalmazható. A (9) egyenlettel kapott víztelítettséget a (2) és (5) egyenletekbe helyettesítve a száraz sűrűség könnyen származtatható.

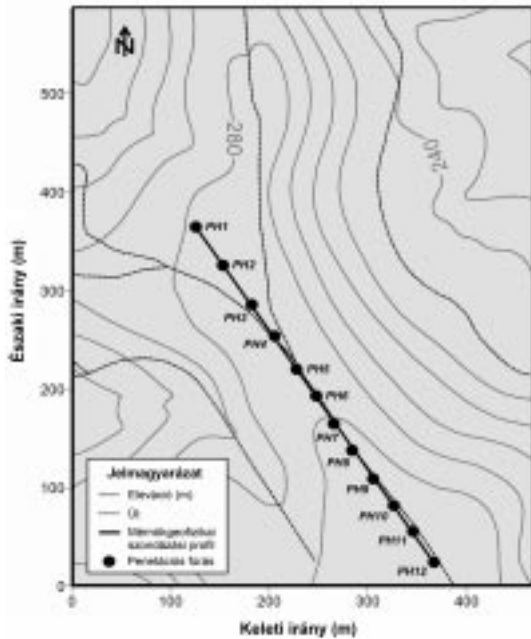


1. ábra: Az első faktor és a víztelítettség kapcsolata.

## Terepi példa

A bátaapáti kutatási területen a penetrációs fúrásokat egy mérési vonal mentén mélyítették (2. ábra). Az első fúrás (PH-1)  $x=0$  m-nél az utolsó (PH-12)  $x=550$  m-nél helyezkedik el. A felszín közelében egy löszös rétegsor található, mely a repedezett gránitra telepedett. MGSZ mérés a talajvízszint feletti régióban 0-27 m-ig történt. A terület közzefizikai paramétereit előzetesen *Drahos* [2] inverziós módszerrel határozta meg. A területen található 12 fúrás összes MGSZ adatát egyetlen statisztikus eljárásban dolgoztuk fel. A 2D faktor analízishez a 3. ábrán látható szelvények álltak rendelkezésre: RCPT – csúcscellenállás (MPa), GR – természetes gamma intenzitás (beütés/perc), DEN gamma-gamma sűrűség ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), NPFI – neutron porozitás (térfogatrész) és RES – fajlagos ellenállás (ohmm). A D adatmátrixot úgy építettük fel, hogy egy adott oszlopban egy mérésfajta összes adata szerepeljen

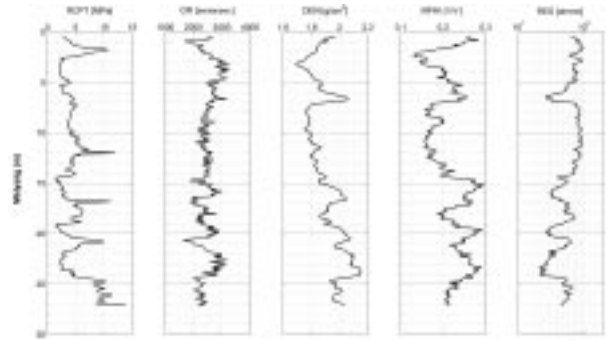
$$D = \begin{pmatrix} RCPT_1 & GR_1 & DEN_1 & NPFI_1 & RES_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ RCPT_{N_1} & GR_{N_1} & DEN_{N_1} & NPFI_{N_1} & RES_{N_1} \\ RCPT_{N_1+1} & GR_{N_1+1} & DEN_{N_1+1} & NPFI_{N_1+1} & RES_{N_1+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ RCPT_{N_1+N_2} & GR_{N_1+N_2} & DEN_{N_1+N_2} & NPFI_{N_1+N_2} & RES_{N_1+N_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ RCPT_{231} & GR_{231} & DEN_{231} & NPFI_{231} & RES_{231} \end{pmatrix} \quad (10)$$



2. ábra: A bátaapáti (Üveghuta) mérési terület topográfiaja és a mérőközfizikai szondázások helyei.

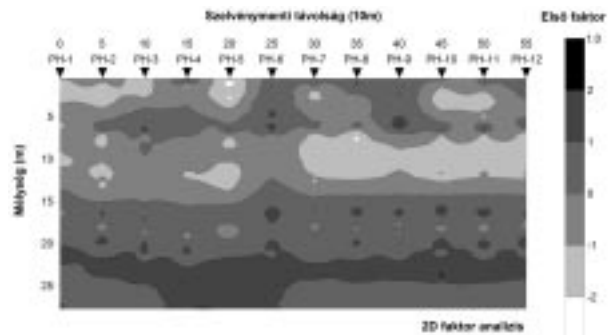
ahol  $\uparrow N = N_1 + N_2 + \dots + N_{12}$  a fúrásokban mért összes mélységpont számát jelöli. A mérési területen összesen  $5 \uparrow N = 15,500$  adatot használtunk fel.

A faktor analízis során két faktort állítottunk elő, mivel az a mért adatrendszer információjának nagy részét (varianciájának a 92%-át) tartalmazta. A becült faktor súlyok az első faktorra vonatkozóan a követke-



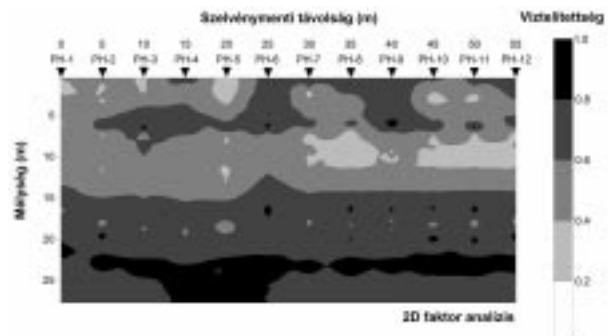
3. ábra: A PH-10 jelű fúrásban mért mérőközfizikai szondázási szelvények.

zők voltak: -0.08 (RCPT), 0.03 (GR), 0.85 (DEN), 0.77 (NPFI) and -0.88 (RES). Ebből az a következtetés vonható le, hogy az első faktorra a porozitáskövető és a víztelítettségre érzékeny szelvények (neutron-porozitás és fajlagos ellenállás) gyakorolták a legnagyobb hatást. A faktor szelvényeket a (8) egyenlet alkalmazásával számítottuk. Az első faktor szelvényét a 4. ábra mutatja.

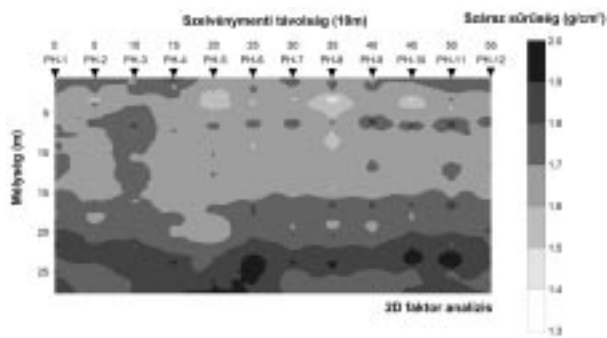


4. ábra: A 2D faktor analízissel előállított első faktor szelvény.

A (9) egyenlet alapján becült víztelítettség értékeket az 5. ábrán olvashatjuk le. Látható, hogy a vizsgált szerkezet 5 rétegből épül fel, melyek különböző mennyiségű vizet és levegőt tartalmaznak. A pórustérben található levegő mennyiségét szükség esetén az  $S_g = 1 - S_w$  összefüggéssel könnyen számíthatjuk. A becült víztelítettségek *Drahos* [2] eredményeivel jó egyezést mutatnak. A víztelítettség értékeket felhasználva kiszámítottuk a (2) egyenlet szerinti víztartalmat, melynél a  $\rho_{ma} = 2.5 \text{ g}/\text{cm}^3$  és  $\rho_w = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$  helyi konstansokat előzetes földtani ismeretek alapján adtuk meg.

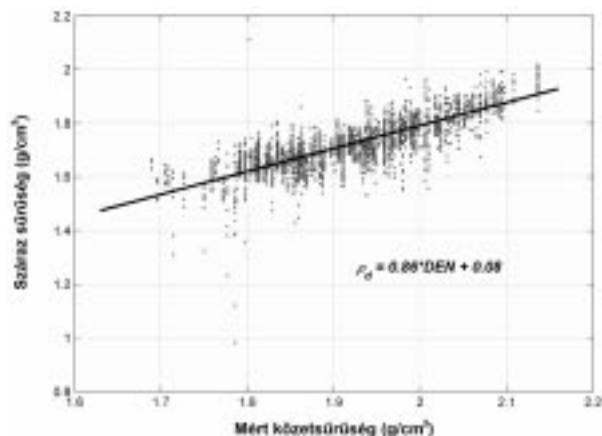


5. ábra: A 2D faktor analízissel becült víztelítettség szelvény.



6. ábra: A 2D faktor analízis eredményeiből származtatott száraz sűrűség szelvény.

A száraz sűrűséget (5) egyenlet segítségével számítottuk. Ennek szelvénye a 6. ábrán látható. Erről leolvasható, hogy a száraz sűrűség értéke nő a mélységgel a talajrétegek kompaktciója révén. Ez a trend megmarad abban az esetben is, amikor a víztelítettség értéke nő az egymást követő alsóbb rétegekben. A legnagyobb sűrűség értékek a legalsó rétegben adódtak, ahol már előfordulhatnak gránit szemcsék is az üledékanyagban. Az MGSZ szelvény vonalában a felszín DK-i irányból ÉNY-felé haladva enyhén lejt. A lejtő mentén lecsú-



7. ábra: A mért közet-sűrűség és a statisztikai eljárással becsült száraz sűrűség regressziós kapcsolata.

szott lösz mozgásának nyoma a felszín alatt is nyomozható. Az MGSZ szelvény 200-550 m-es szakaszán a rétegek nyugodtan települtek, míg az első 200 m-es szakaszon zavar látható. A száraz sűrűség szelvény in-situ információval szolgálhat további geotechnikai vizsgálatok számára, pl. kompaktációs görbék és a nyírású szilárdság számításához. Ezen kívül lehetőség nyílik a mért közet-sűrűség és a száraz sűrűség közötti helyi összefüggés meghatározására. A 7. ábra a bátaapáti területre vonatkozó lineáris regressziós egyenletet mutatja (0.88 korrelációs együttható mellett), mellyel a száraz sűrűséget közvetlenül a gamma-gamma (sűrűség) mérés eredményéből számíthatjuk.

### Következtetések

A cikkben egy új statisztikai eljárást mutattunk be mérnökgeofizikai szondázási adatok feldolgozására.

Ennek keretében becslést végzünk a víztelítettségre, majd abból származtatjuk a száraz sűrűséget. A hagyományosan alkalmazott módszerek általában csak a fajlagos-ellenállás méréseket használják fel a víztelítettség meghatározására. Azonban minden szelvény valamilyen mértékben érzékeny a pórustartalomra. A statisztikai módszer ezt a feltevést felhasználva az összes méréstípust alkalmazza. A kapott eredmények jó egyezést mutatnak a független (minősített) inverz modellezés eredményeivel. A statisztikus módszer olyan méréstípust is felhasznál, melynek kiértékelése inverziós eljárással nem lehetséges, ui. a csúcselellállás mérésre nem állnak rendelkezésre az adat-modell kapcsolatokat leíró elméleti szonda válaszegyenletek. A statisztikai módszer gyors és szoftveresen is könnyen továbbfejleszhető, mely újabb mérési típusokat is képes befogadni. Korlátja a kutatási mélység, mivel az MGSZ méréseket csak könnyen fúrható, konszolidálatlan összletekben alkalmazhatjuk. A száraz sűrűség ily módon történő meghatározása azonban újszerű, mivel az folyamatos, „in-situ” és nagy felbontású információt jelent a geotechnikai alkalmazások számára.

### Köszönetnyilvánítás

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. Köszönetet mondunk az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásáért, valamint dr. Dobróka Mihály professzornak és dr. Drahos Dezsőnek a kutatás elősegítéséért és hasznos tanácsaikért.

### IRODALOM

- [1] Bartlett M. S.: Brit. J. Psychol., 28, 97-104. (1937)
- [2] Drahos D.: Acta Geod. Geophys. Hung., 40, 193-202. (2005)
- [3] Fejes I., Jósa E.: The engineering geophysical sounding method. Principles, instrumentation, and computerised interpretation. In: Ward S H (ed.), Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume II: Environmental and Groundwater, SEG, 321-331. (1990)
- [4] Jöreskog K. G.: Factor analysis and its extensions. In: Cudeck R, MacCallum R C (eds.), Factor analysis at 100, Historical developments and future directions. Lawrence Erlbaum Associates, 47-77. (2007)
- [5] Larionov V. V.: Radiometriya skvazhin. NEDRA, Moskva. (1969)
- [6] Lawley, D. N., and A. E. Maxwell: Factor analysis as a statistical method. The Statistician, 12, 209-229. (1962)
- [7] Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: Cone penetration testing in geotechnical practice, Blackie Academic & Professional, London. (1997)
- [8] Scott C. R.: Soil mechanics and foundations, Third edition, Applied Science Publishers, London. (1980)
- [9] Serra O.: Fundamentals of Well-Log Interpretation: The Acquisition of Logging Data, Elsevier, Amsterdam. (1984)

[10] *Sharma V.*: Environmental and engineering geophysics, Cambridge University Press, Cambridge. (1997)

[11] *Szabó N. P.*: Acta Geophys., 59, 935-953. (2011)

[12] *Szabó N. P., Dobróka M, Drahos D* Factor analysis of engineering geophysical sounding data for water saturation estimation in shallow formations. Geophysics, 77, No. 3, WA35-WA44. (2012)

**DR. SZABÓ NORBERT PÉTER** 1999-ben szerzett geofizikus-mérnöki diplomát a Miskolci Egyetem Bányamérnöki Karán. Végzés óta a Miskolci Egyetemen dolgozik. 2005-ben szerzett PhD fokozatot. Kutatómunkát végez a geofizikai inverzió és a földtudományi statisztika területén. Oktatóként mélyfúrás geofizikával, a gravitációs és mágneses kutatómódszerrel, geostatistikával foglalkozik. Jelenleg a Miskolci Egyetem Geofizikai Intézeti Tanszékének docense és Bolyai János ösztöndíjas kutató.

**KAVANDA RÉKA** 2003-ban szerzett környezetgeofizikus-mérnöki, majd 2004-ben bánya- és geotechnikai mérnöki diplomát a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán. 2004-2007 között a Miskolci Egyetem Mikovinyi Sámuel Földtudományi Doktori Iskola hallgatója, közben 2003-2006-ban az ELGI munkatársa volt. 2007-ben Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszéken (MTA), 2007-2008-ban az Ásványtani-Földtani Intézetben dolgozott. Jelenleg a DACHS GmbH munkatársa. Kutatómunkát végez a geofizikai inverzió és a földtudományi statisztika területén.