

Wpływ właściwości gruntu na oporność elektryczną

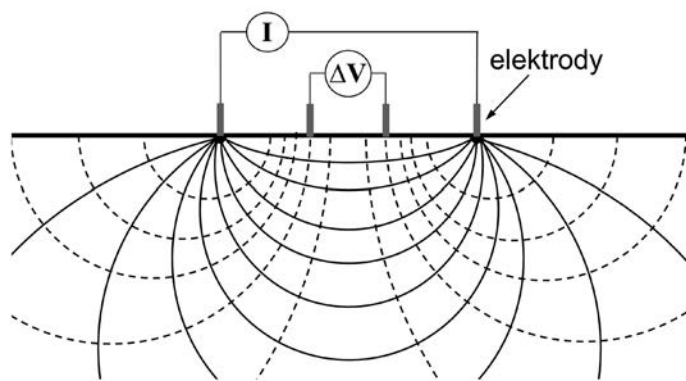
Mgr inż. Łukasz Zawadzki

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Metody badań elektrooporowych są jednymi z najstarszych metod geofizycznych [11]. Ze względu na niskie koszty oraz brak konieczności wykonywania sondowań i wierceń badania elektrooporowe są szeroko stosowane w geologii, hydrogeologii oraz geotechnice, m.in. do takich celów jak: rozpoznawanie budowy podłoża gruntowego, określanie położenia zwierciadła

oraz badania wód gruntowych, wykrywanie złóż, monitoring składowisk odpadów, monitorowanie przepływu zanieczyszczeń itp. [12, 13].

Metody badań elektrooporowych opierają się na zjawisku przewodzenia ładunku elektrycznego przez ośrodek gruntowy. Do pomiarów wykorzystuje się w praktyce układy cztero-elek-



Rys 1. Schemat badań elektrooporowych i rozkładu pola elektrycznego w gruncie

trodowe składające się z dwóch elektrod prądowych służących do wprowadzania w grunt prądu elektrycznego o znanym natężeniu oraz dwóch elektrod pomiarowych, na których jest mierzona różnica potencjałów pola elektrycznego wzbudzonego przez elektrody prądowe (rys. 1) [4, 10, 13]. Znajomość natężenia I (A), różnicy potencjałów ΔV (V) oraz odległości między elektrodami wyrażonej stałą geometryczną K (m) umożliwia na podstawie prawa Ohma obliczenie pozornej oporności właściwej gruntu ρ_a (Ωm) [3, 5, 8, 12]:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Uzyskiwana z pomiarów pozorna oporność właściwa określa, jaką oporność miałby grunt jednorodny przy danym układzie pomiarowym [11]. Stanowi ona podstawę do obliczenia rzeczywistej oporności gruntu i wyników pomiarowych.

Celem badań elektrooporowych jest uzyskanie rozkładu oporności podłoża wraz z głębokością, co stanowi podstawę do ich dalszej interpretacji. Do podstawowych technik pomiarowych w badaniach elektrooporowych należą [4]:

- metody jednowymiarowe (1D) umożliwiające uzyskanie rozkładu zmian oporu gruntu wraz z głębokością w jednym pionie pomiarowym (Pionowe sondowania elektrooporowe VES) lub zmian oporu na określonej głębokości wzdłuż założonego profilu (Profilowania elektrooporowe EP);
- metody dwuwymiarowe (2D) stanowią połączenie metody VES oraz EP; polegają na wykonaniu serii sondowań pionowych wzdłuż określonego profilu, co pozwala uzyskać przekrój obrazujący rozkład oporu gruntu (Tomografia elektrooporowa ERT);
- metody trójwymiarowe (3D) będące rozszerzeniem metod dwuwymiarowych polegające na wykonaniu przekrojów 2D w różnych kierunkach, co umożliwia uzyskanie trójwymiarowego rozkładu oporności gruntu w podłożu.

WPLYW WŁAŚCIWOŚCI GRUNTU NA OPORNOŚĆ

Oporność elektryczna jest funkcją wielu właściwości gruntu, takich jak: wielkość i kształt ziaren, skład mineralogiczny,

struktura gruntu, porowatość, rozkład i wielkość porów, wilgotność, przewodność cieczy zawartej w porach oraz temperatury [1, 2, 3, 6, 7, 10, 12, 13]. Oporność gruntu można przedstawić zatem jako funkcję wielu zmiennych w postaci:

$$\rho = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \quad (2)$$

gdzie:

X_1 – funkcja określająca uziarnienie (zależna od: wielkości i kształtu ziaren, struktury gruntu, mineralogii),

X_2 – funkcja opisująca pory gruntowe (zależna od: porowatości, rozkładu, wielkości i połączenia porów),

X_3 – funkcja opisująca stan nasycenia gruntu (zależna od wilgotności gruntu),

X_4 – funkcja opisująca przewodność cieczy zawartej w porach gruntowych (zależna od rodzaju i stężenia jonów w roztworze),

X_5 – funkcja zależna od temperatury.

WPLYW UZIARNIENIA ORAZ POROWATOŚCI NA OPORNOŚĆ GRUNTU

Na oporność gruntu duży wpływ ma skład mineralogiczny, a w znacznej mierze zawartość minerałów ilastych. Oporność ilów zawiera się w przedziale $10 \div 100 \Omega m$, natomiast piasków i żwirów w przedziale $100 \div 10\,000 \Omega m$ [3, 10, 13]. Na oporność ma także wpływ uziarnienie gruntu oraz jego porowatość. Podstawowym prawem w badaniach oporności gruntu jest prawo Archiego [1], które w ośrodku w pełni nasyconym wodą przyjmuje postać:

$$F = \frac{\rho_{bsat}}{\rho_f} = a \cdot n^{-m} \quad (3)$$

gdzie:

F – wskaźnik uformowania gruntu [–],

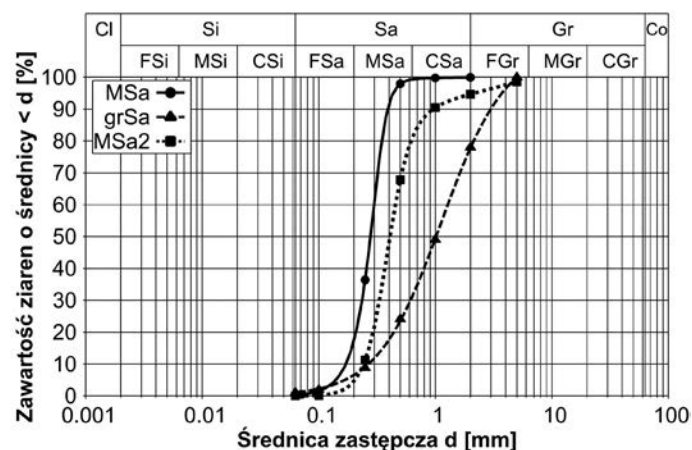
ρ_{bsat} – opór właściwy gruntu w pełni nasyconego [Ωm],

ρ_f – opór właściwy cieczy zawartej w porach gruntowych [Ωm],

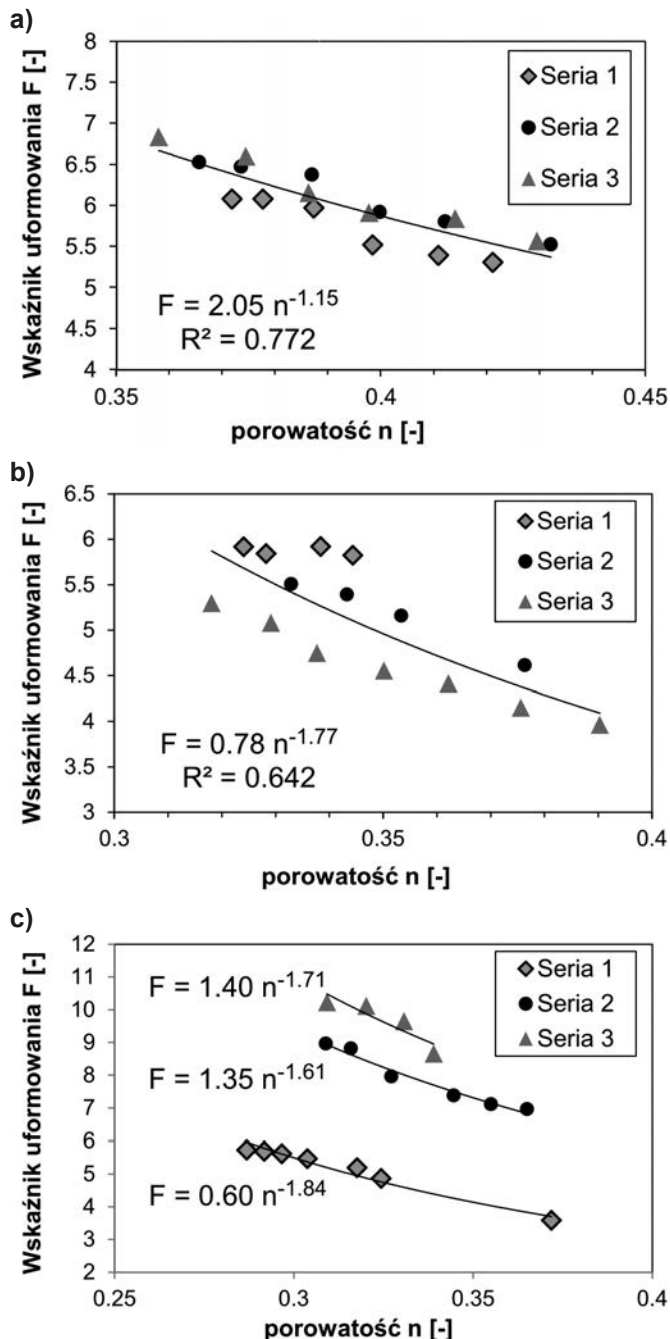
n – porowatość [–],

a, m – stałe empiryczne [–].

Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań zależności oporu elektrycznego od porowatości wyrażone w postaci prawa Archiego dla trzech różnych gruntów MSa ($C_u = 1,7$; $C_c = 1,1$), MSa2 ($C_u = 1,9$; $C_c = 1,0$), grSa ($C_u = 4,8$; $C_c = 1,1$), dla których serie pomiarowe były przygotowywane dwoma różnymi metodami. Krzywe uziarnienia gruntów przedstawiono na rys. 2. Analiza rys. 3 wskazuje, że oporność gruntu (wyrażona wskaźnikiem uformowania) różni się względem serii pomiarowych



Rys. 2. Krzywe uziarnienia badanych gruntów

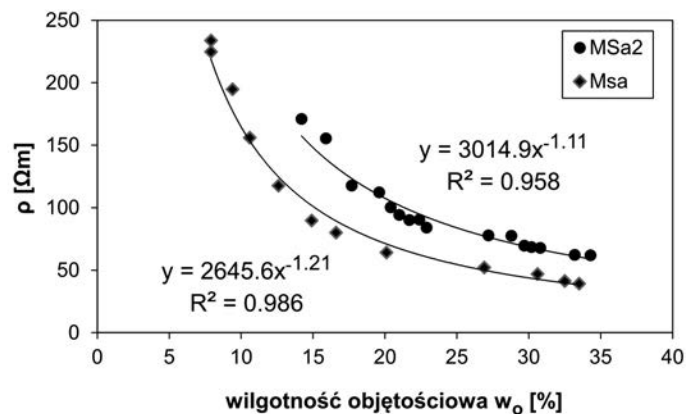


Rys. 3. Zależność wskaźnika uformowania od porowatości gruntu

a) MSa, b) MSa2, c) grSa.

Seria 1 i 2 – próbki przygotowane na sucho metodą skoncentrowanego strumienia piasku [9], Seria 3 – próbka przygotowana metodą sedymentacyjną [9]

tego samego gruntu w zależności od metody przygotowania próbki. Jest to widoczne zwłaszcza dla piasku ze żwirem grSa (rys. 3c), gdzie w poszczególnych seriach pomiarowych uzyskano największe rozbieżności w wynikach. Pozostałe grunty MSa (rys. 3a) oraz MSa2 (rys. 3b) charakteryzują się znacznie większą zbieżnością pomiarów. Zgodność wyników zmniejsza się wraz z wzrostem różnoziarnistości gruntu. Im więcej ziaren o różnej średnicy, tym większa losowość w ich wzajemnym ułożeniu, a tym samym zmian struktury gruntu oraz rozkładu porów, co wpływa w znaczący sposób na wyniki pomiarów oporności gruntu. Na tej podstawie można stwierdzić, że geneza i sposób formowania się poszczególnych warstw gruntu ma zna-



Rys. 4. Zależność oporności właściwej od wilgotności objętościowej gruntu

czenie w badaniach elektrooporowych, co wpływa na wzajemne ułożenie ziaren gruntu.

WPLYW WILGOTNOŚCI NA OPORNOŚĆ GRUNTU

Grunt charakteryzuje się trójfazową budową: faza stała (ziarna gruntu), faza gazowa (powietrze zawarte w porach) i faza ciekła (ciecz zawarta w porach). W układzie takim można uznać, że ziarna gruntu oraz gazy nie przewodzą prądu, a głównym składnikiem umożliwiającym przepływ ładunku elektrycznego przez grunt jest ciecz zawarta w porach. Tym samym, głównym czynnikiem umożliwiającym przepływ prądu w gruncie jest przewodność elektrolityczna i zależy ona głównie od ilości cieczy wypełniającej pory (wilgotności) oraz ilości jonów zawartych w roztworze [6, 13]. W stanie niepełnego nasycenia prawo Archiego [1] przyjmuje postać:

$$\frac{\rho_b}{\rho_f} = a \cdot n^{-m} \cdot S_r^{-B} \quad (4)$$

gdzie:

ρ_b – opór właściwy gruntu [Ωm],
 S_r – stopień wilgotności gruntu [–],
 B – stała empiryczna [–].

Zarówno we wzorze 3 i 4 zakłada się, że prąd jest przewodzony jedynie przez ciecz zawartą w porach, a ziarna i cząstki gruntu nie mają wpływu na przewodność, dlatego nie należy stosować go do gruntów ilastych, gdzie skład mineralny ma znaczący wpływ na oporność gruntu [13].

Jako że zawartość cieczy w porach determinuje jego zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego, jedno z głównych ograniczeń badań elektrooporowych może stanowić stan nasycenia gruntu, a w głównej mierze zbyt niska wilgotność ośrodka. Wraz ze zmniejszaniem się stanu nasycenia gruntu jego oporność znacznie wzrasta, co przy zbyt niskiej wilgotności może uniemożliwić wykonanie pomiarów (rys. 4).

WPLYW CIECZY WYPEŁNIAJĄCEJ PORY NA OPORNOŚĆ GRUNTU

Jak już wcześniej wspomniano na oporność gruntu ma wpływ nie tylko zawartość cieczy w porach gruntowych, ale

także jej skład. Jako że grunt charakteryzuje się przewodnością jonową, jednym z głównych czynników wpływającym na jego właściwości elektrooporowe jest zawartość jonów w roztworze wypełniającym pory. Przewodność elektryczną determinuje nie sama ilość jonów, ale także występowanie określonych jonów (H^+ , OH^- , Na^+ , Cl^- , ...) w roztworze [3, 13], gdyż obecność różnych jonów wpływa na przewodność w inny sposób [13].

Na rys. 5 przedstawiono zmiany oporności właściwej roztworu chlorków 1000 mg/l (rys. 5a) oraz odcieków ze składowiska odpadów Łubna (rys. 5b) w zależności od ich stężenia w roztworze z wodą destylowaną. Oporność gruntów, których pory były wypełnione roztworem chlorków, wynosiła: 40 Ωm w MSa oraz 72 Ωm w grSa. Natomiast w przypadku wypełnienia porów odciekami oporność wynosiła: 8 Ωm w MSa oraz 14 Ωm w grSa.

Na rys. 5a i 5b wskazano, że oporność substancji maleje w sposób potęgowy i już przy niewielkich stężeniach, około 10 ÷ 20%, obserwuje się stabilizację oporności praktycznie na wartości minimalnej dla danego roztworu. Charakterystyki obu roztworów reprezentuje funkcja potęgowa, co oznacza, że ilość określonych jonów w roztworze (roztwór chlorków zawiera jedynie jony Cl^- , natomiast odcieki charakteryzują się zawartością dużej liczby różnych jonów) nie wpływa na samą zmianę charakteru przebiegu zmian oporności w zależności od stężenia, a jedynie może wpływać na wartość oporności.

WPLYW TEMPERATURY NA OPORNOŚĆ

Oporność elektryczna ciał rośnie wraz ze spadkiem temperatury i maleje wraz z jej wzrostem [2, 13], co jest spowodowane wzrostem ruchliwości jonów, a tym samym zdolności przewodzenia ładunku elektrycznego wraz z wzrostem temperatury. Tym samym, aby uzyskać porównywalne wyniki pomiarów oporności, należy je korygować w zależności od temperatury.

Na rys. 6a przedstawiono zależność oporności wody wodociągowej od temperatury, na rys. 6b przedstawiono zależność oporności gruntu MSa2 (pory wypełnione wodą wodociągową o parametrach jak na rys. 6a) od temperatury. Zmiany oporności ośrodka maleją stopniowo wraz z wzrostem temperatury i po osiągnięciu około 40°C szybkość zmian oporności z temperaturą znacznie maleje.

W przypadku rozpatrywania wąskiego zakresu temperatur poprawka oporności może być zapisana w odniesieniu do temperatury referencyjnej w postaci funkcji liniowej [13]:

$$\rho_t = \rho_{20}[1 + \alpha(T - 20)] \quad (5)$$

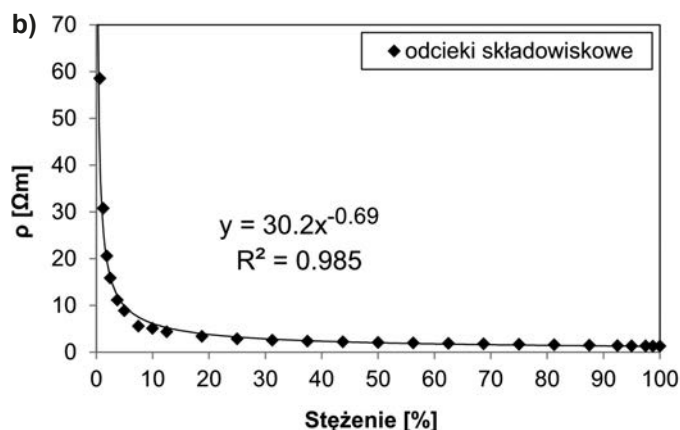
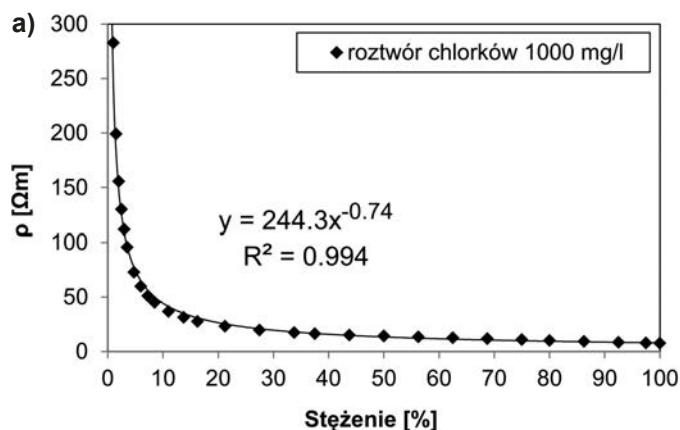
gdzie:

ρ_t – opór właściwy w temperaturze T [Ωm],

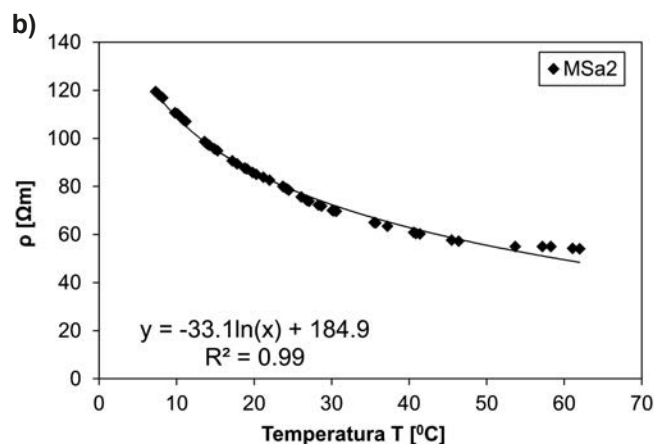
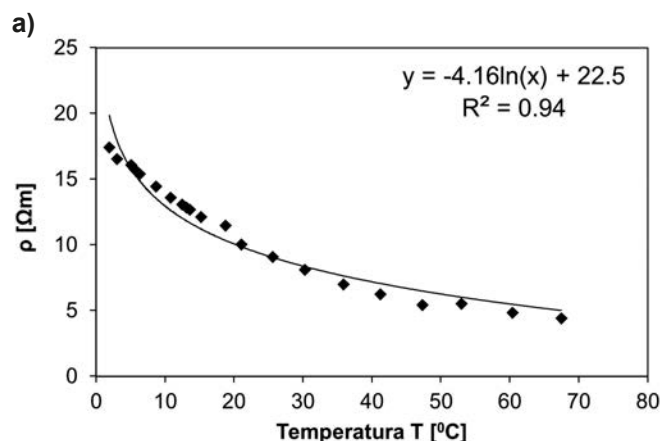
ρ_{20} – opór właściwy w temperaturze 20°C [Ωm],

T – temperatura, w jakiej wykonano pomiar [°C],

α – współczynnik korekcyjny [–].



Rys. 5. Zależność oporności właściwej od stężenia
a) roztworu chlorków 1000 mg/l, b) odcieków składowiskowych



Rys. 6. Zależność oporności od temperatury
a) dla wody wodociągowej, b) dla próbki MSa2

PODSUMOWANIE

Właściwości elektrooporowe podłoża zależą od wielu parametrów i dotyczą zarówno cech samych gruntów, jak i własności cieczy zawartej w porach. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że:

- oporność nie jest cechą stałą gruntu i może ona różnić się znacznie dla tego samego gruntu w zależności od jego struktury, a różnice te są tym większe, im większa jest różnoziarnistość gruntu,
- porowatość gruntu, a tym samym wolna przestrzeń, jaką może wypełniać ciecz, znacząco wpływa na wyniki badań oporności; opór elektryczny gruntu wzrasta wraz ze spadkiem porowatości,
- głównym czynnikiem umożliwiającym przepływ prądu w gruncie jest ciecz zawarta w porach, tym samym wraz ze spadkiem wilgotności gruntu jego oporność wzrasta,
- zawartość jonów w cieczy wypełniającej pory gruntowe w znacznym stopniu determinuje zdolności do przewodzenia prądu; oporność gruntu może się różnić kilkusetkrotnie w zależności od składu cieczy wypełniającej pory,
- właściwości elektrooporowe w znacznym stopniu zależą od temperatury; w przedstawionym gruncie MSa2 oporność właściwa zmienia się o około 2,6% na 1°C w zakresie temperatur 10 ÷ 40°C.

LITERATURA

1. Archie G. E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 146, 1942, 54-61.

2. Bai W., Kong L., Guo A.: Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5, 2013, 406-411.
3. Dafalla M. A., AlFouzan F. A.: Influence of Physical Parameters and Soil Chemical Composition on Electrical Resistivity: A Guide for Geotechnical Soil Profiles. *International Journal of Electrochemical Science*. 7(4), 3191-3204, 2012.
4. Dahlin T.: The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27, 2001, 1019-1029.
5. Dias R., Hoefel S. dos S., de A. Costa E. G., Carrer J.A.M., de Lacerda L.A.: Two-dimensional Simulation of the Wenner Method with the Boundary Element Method - Influence of the Layering Discretization. *Mecánica Computacional XXIX*: 2010, 2255-2266.
6. Frohlich R.K., Parke C.D.: The Electrical Resistivity of the Vadose Zone – Field Survey. *Groundwater*, 27(4), 1989, 524-530.
7. Fukue M., Minato T., Horibe H., Taya N.: The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology*, 54, 1999, 43-53.
8. Herman R.: An introduction to electrical resistivity in geophysics. *American Journal of Physics*, 69(9), 2001, 943-952.
9. Jastrzębska M., Kalinowska-Pasieka M.: Wybrane metody badawcze we współczesnym laboratorium geotechnicznym: od podłoża do parametrów gruntowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
10. Lech M., Garbulewski K.: Określanie porowatości gruntów niespoistych na podstawie pomiarów oporności elektrycznej. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 46(4), 2009, 48-56.
11. Loke M. H., Chambers J. E., Kuras, O.: Instrumentation, electrical resistivity. W *Solid Earth Geophysics Encyclopaedia* (2nd Edition), Springer-Verlag, 2011, 599-604.
12. McCarter W. J., Blewett J., Chrisp T. M., Starrs G.: Electrical property measurements using a modified hydraulic oedometer. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 2005, 655-662.
13. Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G.: Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*, 83(2), 173-193.