

Ryszard Drożdżak*, Kazimierz Twardowski**

**ANALIZA POWTARZALNOŚCI I ODTWARZALNOŚCI (*R&R*)
JAKO NARZĘDZIE OCENY PORÓWNAWCZEJ
RÓŻNYCH METOD LABORATORYJNYCH
BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI GRUNTÓW*****

1. WSTĘP

Podstawowym parametrem petrofizycznym gruntów wykorzystywanym do ilościowego opisu przepływu w nich wody jest współczynnik filtracji (wodoprzepuszczalność, przewodność hydrauliczna, stała Darcy'ego).

W praktyce znanych i stosowanych jest wiele sposobów jego określania [2, 4, 5, 17]: badania laboratoryjne, bezpośrednie pomiary prędkości filtracji, próbne pompowania, zatlaczanie do studni i dołów chłonnych, pośrednie sposoby oparte na wykorzystaniu wzorów empirycznych.

Z wymienionych sposobów oznaczania współczynnika filtracji gruntów na szczególną uwagę zasługują metody laboratoryjne, cechujące się relatywnie niskimi kosztami badań.

W praktyce laboratoryjnej opracowano bardzo różne przyrządy do określania współczynnika filtracji gruntów, przy czym ich konstrukcje oraz zasady pomiaru uzależnione są w szczególności od [2, 6, 17]:

- rodzaju materiału gruntowego poddanego badaniu,
- możliwości technicznych laboratorium,
- wymaganej koniecznej dokładności pomiaru [15].

Ze względu na powyższe uwarunkowania oraz zróżnicowanie założeń fizycznych różnych metod laboratoryjnego określania współczynnika filtracji gruntów należy się liczyć z istotnym wpływem stosowanej metody na uzyskiwane wyniki pomiarów [3, 4, 6].

* Doktorant, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

*** Praca wykonana częściowo w ramach badań statutowych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

W celu porównania różnych metod laboratoryjnych pomiaru współczynnika filtracji gruntów podjęto próbę ich oceny z wykorzystaniem statystycznej analizy powtarzalności i odtwarzalności *R&R* (*Repeatability & Reproducibility*). Zastosowanie tej analizy pozwala na praktyczne wyznaczenie liczbowych wartości parametrów systemu pomiarowego decydujących o wiarygodności uzyskiwanych danych i w konsekwencji ocenę przydatności poszczególnych metod [1, 12, 14].

Analizę prowadzono w oparciu o ogólnie dostępny pakiet komputerowy *STATISTICA 8*, w szczególności jego moduł *Statystyki przemysłowe*.

Aktualne standardy metrologiczne [11, 15] określają, że:

- warunki powtarzalności dotyczą warunków, w których niezależne wyniki badań takich samych jednostek badania otrzymane są za pomocą tej samej metody, w tym samym laboratorium przez tego samego operatora z użyciem tego samego wyposażenia, w krótkich odstępach czasu;
- warunki odtwarzalności – różnią się od warunków powtarzalności: różnymi laboratoriami, różnymi operatorami i użyciem różnego wyposażenia;
- granice powtarzalności lub odtwarzalności – wartości, których z prawdopodobieństwem 95% nie przekraczają wartości bezwzględnych różnic między dwoma wynikami badania otrzymanymi w spełnionych odnośnych warunkach (powtarzalności lub odtwarzalności).

Jak wynika z reguł stosowanych w inżynierii jakości [12], analiza zdolności systemów pomiarowych (*Measurement System Analysis – MSA*) w odniesieniu do procesów produkcji lub działów kontroli jakości przeprowadzana jest na podstawie procedury obliczania powtarzalności i odtwarzalności (metody *R&R*) z uwzględnieniem wpływu użytkownika (operatora wykonującego pomiar). Przy tym miarami powtarzalności i odtwarzalności są odchylenia standardowe s wyników badania (pomiarów) otrzymanych w spełnionych odnośnych warunkach (powtarzalności lub odtwarzalności) [11, 15].

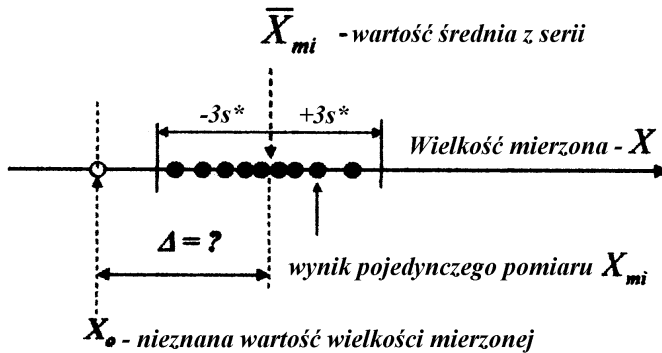
2. WPROWADZENIE DO ANALIZY *R&R* (ANALIZY POWTARZALNOŚCI I ODTWARZALNOŚCI)

Analiza *R&R* jest powszechnie stosowana w przemyśle masowej produkcji: samochodowym, elektronicznym, farmaceutycznym itp., gdzie ilość danych potrzebnych do analiz, których wyniki są podstawą podejmowania decyzji, jest bardzo duża. Jeżeli dane nie będą wystarczająco wiarygodne, to w konsekwencji podejmowane będą błędne decyzje [1, 14].

Ogólnie znaną prawdą jest, że dane uzyskiwane za pomocą narzędzi i systemów pomiarowych nie są ani identyczne, ani idealne. Ma wpływ na to fakt, iż system pomiarowy to nie tylko narzędzia pomiarowe, ale również różna metodyka, szablony, operatorzy, oprzyrządowanie, oprogramowanie, sprzęt komputerowy, warunki otoczenia i inne elementy mogące mieć wpływ na końcowy wynik pomiaru [12, 14].

Oznacza to w praktyce, że każdy wynik pomiaru x_m uzyskany za pomocą systemu pomiarowego tylko w pewnym stopniu odzwierciedla nieznaną rzeczywistą wartość x_o , mie-

rzoney cechy; aktualnie w metrologii przyjmowaną jako tzw. przyjęta wartość odniesienia (PWO) [11, 15]. W praktyce oczywiste jest, że aby wyznaczyć poprawną wartość wyniku pomiaru, należałoby przede wszystkim określić wartość Δ (bezwzględnego błędu pomiaru), co w praktyce jest bardzo rzadko wykonalne. Dodatkowo, na rzeczywisty system pomiarowy wpływ ma wiele czynników wspomnianych wcześniej; czynniki te nie są stabilne w czasie i powodują losową zmienność wyników powtarzanych pomiarów. W wyniku takiego podejścia przyjmuje się, że wyniki pomiarów są realizacjami zmiennej losowej i należy je opracowywać z wykorzystaniem metod statystycznych. W najprostszym przypadku ich zmienność można opisać teoretycznym rozkładem normalnym $N(\mu, \sigma)$, gdzie μ to wartość oczekiwana, którą traktujemy jako miarę położenia, natomiast σ to odchylenie standardowe będące miarą rozproszenia wyników. Ponieważ w rzeczywistości dysponujemy tylko ograniczoną serią pomiarów, to oszacowaniem miary położenia będzie wartość średniej arytmetycznej z serii $\bar{x}_{mi}$, zaś oszacowaniem ich miary rozproszenia będzie odchylenie standardowe z serii, s^* . Rysunek 1 przedstawia opisaną powyżej sytuację dla powtarzanych pomiarów tej samej wielkości o nieznanej wartości x_o .



Rys. 1. Graficzna interpretacja statystycznego opisu serii wyników pomiarów [12]

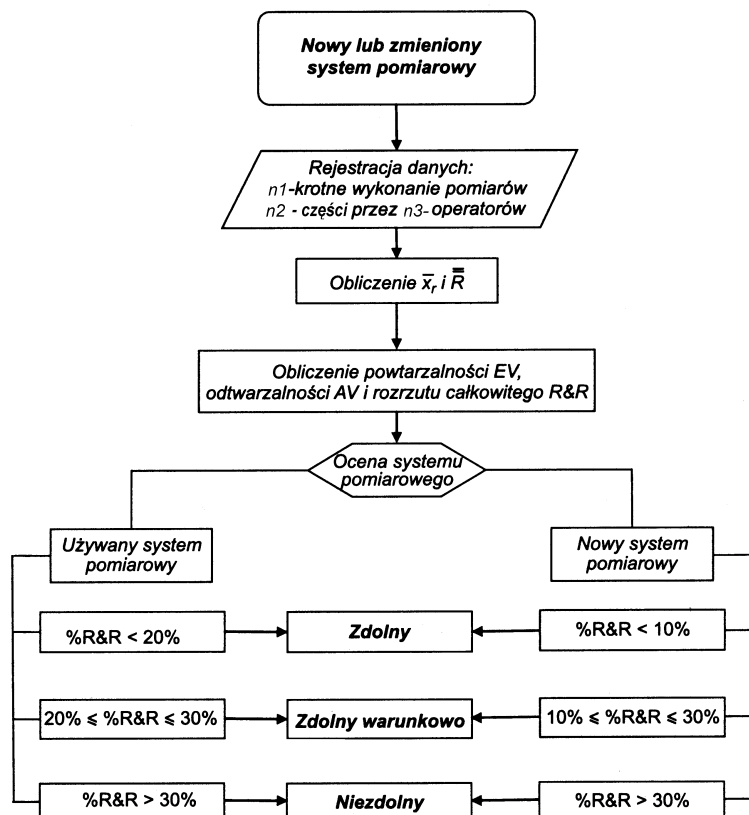
Wartość przedstawionego odchylenia pozwala na oszacowanie maksymalnego rozrzutu wyników pomiaru, czyli ustalenia przedziału wartości [12, 14]:

$$\{ \bar{x}_{mi} - 3s^*, \bar{x}_{mi} + 3s^* \} \quad (1)$$

w którym z prawdopodobieństwem 0,997 powinny mieścić się wyniki kolejnych powtarzanych pomiarów.

Istotą analizy *R&R* jest powtarzanie sytuacji przedstawionej na rysunku 1, ale w takim układzie eksperymentu, że próbę o tej samej liczebności powtarzanych pomiarów uzyskuje się w naszym przypadku z różnych metod [1, 12]. Podczas analizy nie jest istotna znajomość błędu Δ wnoszonego przez poszczególne metody, jednakże układ eksperymentu zapewnia, że błędy bezwzględne Δ , mimo że nie są znane, zostają uwzględnione w końcowych obliczeniach. Uwzględnione są one przy ocenie rozrzutu całkowitego, będącego rezultatem łącznego wpływu wszystkich błędów, zarówno losowych, jak i systematycznych. Wyznaczenie przedziału *R&R* pozwala obliczyć współczynniki zdolności pomiarowej – *MCI*

(*Measurment Capability Index*), których wartości decydują o tym, czy oceniany system pomiarowy może być stosowany czy też nie. Schemat blokowy opisanej procedury pokazano na rysunku 2, gdzie poszczególne parametry są obliczane w oparciu o metodę średniej i rozstępu [1, 12, 14].



Rys. 2. Schemat blokowy procedury oceny systemu pomiarowego metodą R&R [12]

3. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH GRUNTÓW

Dane wykorzystane do analizy stanowią zasadniczą część archiwalnych wyników badań laboratoryjnych współczynnika filtracji gruntów spoistych, wykonanych w 1997 r. w Zakładzie Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie [3, 5]. Obejmują one ponad 200 niezależnych badań wykonanych m.in. z wykorzystaniem 6 różnych metod laboratoryjnych w odniesieniu do 6 rodzajów gruntów spoistych.

Wyniki te zostały życzliwie udostępnione przez Prof. Ryszarda Kaczyńskiego, który kierował pracami badawczymi w 1997 r. Zasadnicze rezultaty tych badań były w 2000 r. prezentowane na seminarium nt. „Aktualne problemy geologiczno-inżynierskich badań podłoża budowlanego i zagospodarowania terenu” [3] oraz są przechowywane w Archiwum [5].

Próbki gruntu o strukturze nienaruszonej NNS poddane badaniom pochodziły z: mady wiślanej (głina pylasta) z Warszawy (Saska Kępa), gliny zwałowej (głina piaszczysta) – cztery wiercenia z Krzyżanówka koło Kutna, iłu płoceńskiego z Warszawy (poletko do świadczalne Stegny).

Mada wiśłana (średnia zawartość frakcji iłowej 18%) pobrana na tarasie zalewowym z głębokości 1,5 m p.p.t. Główne składniki to kwarc (68%) i minerały ilaste (28,3%), w większości illit, występuje także kaolinit oraz beidelit. Brak kalcytu, zawartość frakcji organicznej 0,7%. Wg normy gleboznawczej [9] badane próbki reprezentują pył ilasty.

Głina zwałowa o średniej zawartości frakcji iłowej w granicach 18–22% i pyłowej w zakresie 12–25%, pobrana z głębokości 4,2–5,8 m p.p.t. Wszystkie gliny wykazują jednolity skład mineralny. Główne składniki glin to kwarc (60–65%) i minerały ilaste (24–27,5%), głównie illit i beidelit; gliny zawierają także kalcyt (8,4–10,3%), getyt (1–2,5%) oraz substancję organiczną (0,2–0,4%). Z uwagi na to, że glina zwałowa pobierana była z czterech różnych otworów wiertniczych, zakwalifikowano ją do badań jako cztery odrębne grunty, należące wg normy [9] do gliny średniej oraz gliny lekkiej.

Ił płoceński o średniej zawartości frakcji iłowej (77%), pobrany z głębokości od 5,1 do 7,0 m p.p.t. Głównym składnikiem iłu są minerały ilaste (około 67%), głównie beidelit występujący w przewadze nad illitem i kaolinitem. Zawartość kwarcu 27,7%, getytu 5,4%. Brak kalcytu i substancji organicznej. Według normy [9] badany grunt scharakteryzowano jako ił ciężki. Wybrane właściwości fizyczne analizowanych gruntów przedstawione są w tabeli 1 [3, 5].

Tabela 1

Zestawienie ocen średnich arytmetycznych $\bar{x}$ oraz zakresów zmienności ($x_{min} - x_{max}$) wybranych właściwości fizycznych badanych gruntów spoistych [5, ze zmianami]

Grunt	Właściwości fizyczne				
	Gęstość właściwa gruntu ρ_s [t/m ³]	Gęstość objętościowa gruntu ρ [t/m ³]	Wilgotność naturalna w_n [%]	Porowatość n [%]	Stopień wilgotności S_r [%]
1	2	3	4	8	9
Pył ilasty	2,68	1,85	19,21	42,31	0,71
	2,67–2,69	1,83–1,87	18,53–20,05	41,42–43,28	0,67–0,76
Głina lekka	2,65	2,12	9,10	26,79	0,66
	2,63–2,67	2,10–2,15	8,50–9,50	26,03–27,17	0,63–0,73
Głina średnia	2,66	2,13	9,85	27,07	0,71
	2,64–2,68	2,10–2,15	9,45–10,15	26,32–28,20	0,69–0,72
Głina średnia	2,68	2,11	13,53	30,59	0,82
	2,66–2,69	2,08–2,13	12,96–14,05	28,85–31,34	0,76–0,84
Głina lekka	2,67	2,14	11,35	28,9	0,78
	2,66–2,68	2,13–2,16	10,96–11,73	27,71–28,46	0,76–0,82
Ił ciężki	2,67	1,88	33,55	47,27	1
	2,60–2,70	1,87–1,89	33,15–34,05	46,82–47,57	0,99–1,00

Z przedstawionej analizy właściwości fizycznych wynika, że badane grunty spoiste charakteryzują się małym stopniem niejednorodności.

4. CHARAKTERYSTYKA METOD BADAWCZYCH WYKORZYSTANYCH DO BADAŃ WSPÓLCZYNNIKA FILTRACJI GRUNTÓW

Badania współczynnika filtracji gruntów wykonano wykorzystując 6 następujących metod [3, 5]:

1. sakedometr,
2. GEONOR,
3. edometr,
4. aparat trójosiowego ściskania TRX.
5. konsolidometr,
6. SEM/STIMAN.

Wymienione metody podzielić można na **metody bezpośrednie**, oparte na bezpośrednim pomiarze współczynnika filtracji (sakedometr, GEONOR, edometr, aparat trójosiowy TRX) oraz **metody pośrednie**, polegające na obliczaniu współczynnika filtracji na podstawie badań innych właściwości gruntu; do tych metod zaliczamy konsolidometr oraz metodę SEM/STIMAN.

Dla każdej metody przeprowadzono serie niezależnych badań dla wszystkich 6 rodzajów gruntów. Badania bezpośrednie wykonano przy naprężeniu równym obciążeniu geologicznemu nadkładu i przy spadkach hydraulicznych równych i większych od 30.

Do realizowanej analizy *R&R* wykorzystano wyniki badań bezpośrednich, tj. uzyskane w oparciu o sakedometr, GEONOR, edometr i aparat TRX.

Sakedometr (zmodyfikowany edometr) pozwala na kontrolę ciśnienia ssania gruntów, które maleje wraz ze wzrostem nasycenia. Badania w sakedometrze wykonane zostały przez S. Żakowicza i K. Grabulewskiego z SSGW, były prowadzone przy założeniu pełnego nasycenia gruntu ($S_r=1$). W takim stanie fizycznym próbki mamy do czynienia z układem dwufazowym, w którym filtracja powinna zachodzić bez dodatkowych przeszkód. Badania tą metodą są długotrwałe; średni czas trwania jednego badania wynosi 2–3 tygodnie.

Permeometr kompresyjny do samodzielnego badania przepuszczalności gruntów spoistych zastosowany w ramach opisywanych badań wyprodukowany był przez norweską firmę **GEONOR**. Współczynnik filtracji określa się zgodnie z prawem Darcy'ego w zakresie spadków hydraulicznych do 100. Metoda oparta jest na zasadzie stałego spadku hydraulicznego. Wysokie wartości spadków hydraulicznych pozwalają na skrócenie czasu badań do kilku dni.

Edometryczne badania współczynnika filtracji przeprowadzono w klasycznym edometrze (produkcji ZAN Kraków). Aparat podłączony był do tablicy sterującej umożliwiającej zadawanie wymaganych spadków hydraulicznych oraz kontrolowanie wysokości słupa

wody w czasie badania. Jest to jedna z najstarszych, lecz do dzisiaj stosowanych metod badawczych gruntów.

Badania współczynnika filtracji w aparacie trójosiowego ściskania TRX wykonywano zgodnie z metodyką Head'a (1985). W aparacie sprawdzano stopień nasycenia próbek badanych gruntów określając parametr Skempton'a B [8]. Jeśli wartość $B = 0,95 \pm 1,00$, uznawano grunt za nasycony wodą. W przypadku $B < 0,95$, próbkę gruntu poddawano procesowi nasączenia wodą za pomocą przystawki *back pressure* wraz z kolumną naczyń przewlewowanych. Dla wszystkich testów spadek hydrauliczny był równy 30.

5. UZYSKANE WYNIKI ANALIZY R&R

Bloki pomiarowe do analizy R&R zestawiono wg następującego schematu [1, 12, 14]: cztery bezpośrednie metody pomiarowe jako „operatorzy”, natomiast badane grunty jako „części”. Aby umożliwić analizę metody edometrycznej, dla której badania współczynnika filtracji w przypadku trzech gruntów były traktowane jako wskaźnikowe, licznosc próby zwiększono do 9. Podobnie postępowano w innych przypadkach, gdy licznosc próby była mniejsza; brakujące dane zastępowano średnią arytmetyczną. Zabiegi te były konieczne ze względu na warunek tej samej licznosci dla każdej analizowanej próby (w odniesieniu do różnych gruntów).

Wszystkie wyniki badań (oprócz wykonanych edometrem) poddano analizie statystycznej w celu wykrycia w seriach pomiarowych ewentualnych wyników pomiarów dotyczących tzw. wartości odstających¹⁾ lub tzw. wyników wątpliwych²⁾. W tym celu wykorzystano zasady zawarte w normie [7], wcześniej normalizując rozkłady przez logarytmowanie wyników oraz testując ich rozkład normalny. Badania statystyczne ujawniły występowanie jednego wyniku wątpliwego (być może obciążonego błędem grubym) – w próbie dla gliny lekkiej²⁾ uzyskanej za pomocą metody konsolidometrycznej.

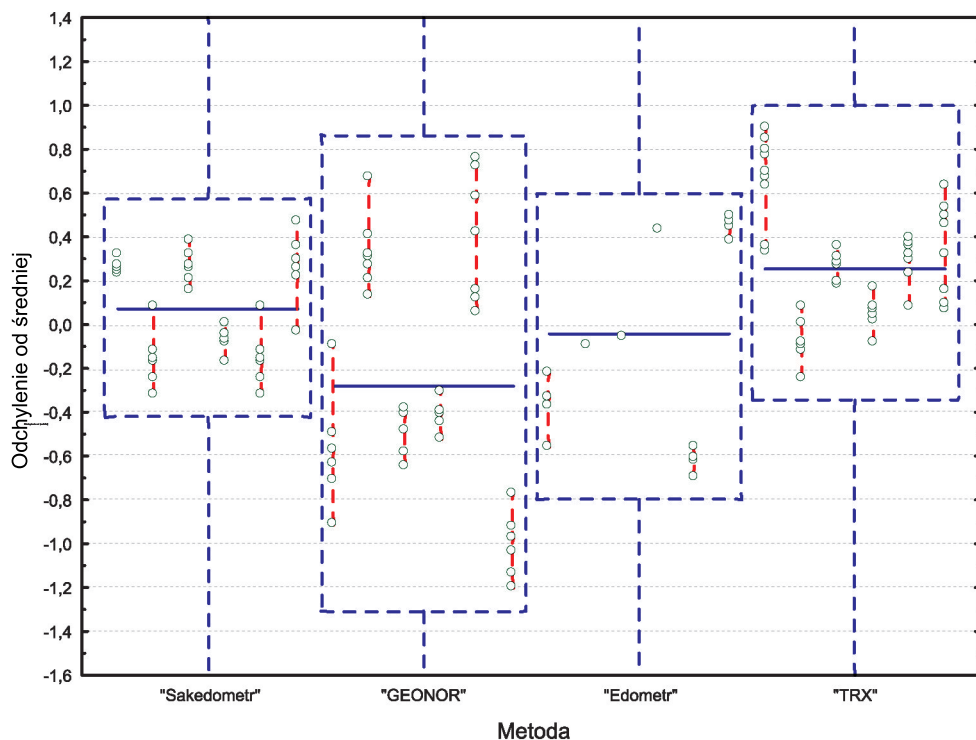
Wyniki analizy R&R dla 4 metod bezpośrednich w odniesieniu do 6 różnych gruntów przedstawione są na rysunku 3 oraz w tabelach 2 i 3.

Aby zinterpretować wykres na rysunku 3, należą się Czytelnikowi pewne wyjaśnienia. Poszczególne punkty na wykresie ilustrują odchylenia pojedynczych pomiarów od średniej dla danego gruntu. Długość pionowych linii łączących punkty dla jednej próbki pokazuje zmienność wskazań metody przy pomiarach tej próbki, a więc określa powtarzalność. Jeśli by wszystkie pomiary gruntu dały identyczny wynik, to linie nie będą widoczne; będzie tylko jeden punkt, jak jest w przypadku metody edometrycznej (stan ten wynika nie z doskonałej powtarzalności, lecz traktowania metody edometrycznej jako wskaźnikowej).

¹⁾ Wartości odstające – obserwacje których wartości zgodnie z normą [10], tak dalece odbiegają od pozostałych, iż sugeruje to, że mogą pochodzić z innej populacji, lub być wynikiem błędu pomiaru.

²⁾ Wynik wątpliwy – wynik, który zgodnie z normą [10], różni się od pozostałych wyników w stopniu przewyższającym różnice, jakie w stosowanej metodzie pomiarów są spodziewane.

Każdy metoda reprezentowana jest na wykresie przez ramkę. Pozycja ramki w pionie wskazuje na ewentualne, ogólne odchylenie danej metody od średniej. Odchylenie dla wszystkich gruntów mierzonych za pomocą danej metody ilustruje pozioma ciągła linia wewnątrz ramki, natomiast wysokość ramki odzwierciedla zmienność wskazań metody.



Rys. 3. Wykres powtarzalności i odtwarzalności pomiarów dla 4 bezpośrednich metod w odniesieniu do 6 gruntów

Analizując rysunek 3, można uznać, że wyniki pomiarów dla metody GEONOR mają największy rozrzut i cechują się najmniejszą powtarzalnością w odniesieniu do gruntów. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku sakedometru, gdzie powtarzalność dla gruntów jest duża, również rozrzut różnych gruntów nie jest znaczny. Analiza obliczeń wskaźników zdolności pomiarowej w tabelach 2 i 3 dostarcza także dowodów potwierdzających występowanie takich zależności.

Omawiając przedstawione w tabelach 2 i 3 wyniki dla czterech metod można stwierdzić, że różnice między metodami statystycznie są nieistotne. W odniesieniu do analizy procentowego wkładu wszystkich składników zmienności otrzymujemy następujące wartości: powtarzalność pomiarów 1,76%, odtwarzalność (różne metody) –1,85%, interakcje metoda – grunty 24,61%, zmienność pomiędzy gruntami – 71,78% oraz łącznie powtarzalność i odtwarzalność ($R\&R$) – 28,22% całkowitej zmienności. Widać więc, że największa

składowa całkowitej zmienności pochodzi od zmienności między gruntami (czyli zależy od ich niejednorodności). Reasumując, można pozytywnie ocenić układ analizowanych 4 metod badawczych; łączna wartość $R\&R$ wynosi 28,22% i mieści się w przedziale dopuszczalnych wartości warunkujących pozytywną ocenę. Potwierdza ją także wartość $R\&R$ obliczona z rozstępu; jest ona mniejsza, i wynosi tylko 7,45%.

Tabela 2

Kompletna tabela ANOVA dla wszystkich źródeł wariancji – układ 4 metod w odniesieniu do 6 gruntów

Źródło wariancji	Analiza wariancji (95% granice ufn. dla odch. std.) Zmienna: k – współczynnik filtracji								
	sumy kwadrat.	df	średnia kwadrat.	F	p	oczekiwana wariancja	oczekiwane Odch.Std	dolna gr. dla OdSt	górną gr. dla OdSt
Metoda	8,1291	3	2,7097	1,447	0,268809	0,0155	0,1245	0,0000	0,8250
Grunt	117,7873	5	23,5574	12,580	0,000063	0,6023	0,7761	0,3618	2,0382
Metody vs grunt	28,0959	15	1,8730	126,580	0,000000	0,2065	0,4544	0,3282	0,7110
Błąd	2,8412	192	0,01480			0,0148	0,1217	0,1106	0,1352
Razem	156,8535	215							

Tabela 3

Tabela wskaźników pomiarowych obliczonych metodą wariancji – układ 4 metod w odniesieniu do 6 gruntów

Źródło	Zmienna: k – współczynnik filtracji Śred=-8,7267 Metody: 4 Grunty: 6					
	estymow. sigma	0,95 doln gr.ufn.	0,95 gór. gr.ufn.	estymow. wariancja	% R&R	% ogół
Powtarzalność	0,1216	0,1106	0,1352	0,0148	6,25	1,76
Metoda	0,1245	0,0000	0,8250	0,0154	6,54	1,85
Metoda vs grunt	0,4544	0,32826	0,7110	0,2065	87,20	24,61
Grunt	0,7761	0,3618	2,0382	0,6023		71,78
Łącznie R&R	0,4866	0,4502	0,9403	0,2368	100,0000	28,22
Ogół	0,9160			0,8391		100,0000

6. PODSUMOWANIE

W polskich laboratoriach badania współczynnika filtracji gruntów przeprowadza się różnymi metodami, często opartymi na różnych założeniach fizycznych. Dotyczy to w szczególności gruntów spoistych, w tym cechujących się słabymi właściwościami filtracyjnymi (słabo- i półprzepuszczalnymi). Brak szczegółowych wytycznych dotyczących stosowania konkretnych metod, poza niejednorodnością samych gruntów, jest główną przyczyną uzyskiwania znacznych rozrzutów wyników, dochodzących niekiedy nawet do 4 rzędów wartości (np. $10^{-4} \div 10^{-8}$ m/s) [5, 6, 17].

W związku z tym zagadnienie oceny dokładności, w szczególności poprawności wyników badań, ma dla praktyki szczególne znaczenie; mogą się one istotnie różnić w zależności od stosowanej metody. W celu porównania wybranych stosowanych metod podjęto próbę wykorzystania narzędzi statystycznych używanych w inżynierii jakości – w przemyśle do sterowania jakością wyrobów i procesów wytwarzania. Jako przydatną do oceny porównawczej użyto analizy *R&R* (analizy powtarzalności i odtwarzalności), która mimo pewnych uproszczeń umożliwia skonstruowanie odpowiedniego schematu pomiarowego. Dodatkową zaletą tej analizy jest fakt, iż pozwala ona liczyć odchylenie standardowe zbioru wskazań z rozstępu, co jest szczególnie istotne dla prób o małej liczności. Najważniejsze wnioski wynikające z wykonanej analizy można sformułować następująco:

1. Analizę powtarzalności i odtwarzalności *R&R* przeprowadzono dla schematu pomiarowego: 4 metody bezpośrednie (sakedometr, GEONOR, edometr i aparat trójosiowego ściskania TRX) w odniesieniu do 6 gruntów.
2. Wyniki analizy wykazały, że różnice między metodami są statystycznie nieistotne. Według schematu oceny jakości można pozytywnie ocenić ten układ; łączna wartość *R&R* wynosi 28,22% i mieści się w granicach dopuszczalnych dla pozytywnej oceny (rys. 2). Tę ocenę potwierdza także wartość *R&R* liczona z rozstępu; jest ona mniejsza i wynosi tylko 7,45%. Generalnie można stwierdzić, że analizowane metody bezpośredniego wyznaczania współczynnika filtracji gruntów: sakedometr, GEONOR, edometr oraz metoda TRX mogą być porównywalne i stosowane zamiennie.
3. Wyniki analizy wskazują na wysoką zmienność wyników pomiarów w odniesieniu do różnych gruntów; dla badanego schematu pomiarowego wartość ta wynosi 71,78% całkowitej zmienności układu. Może to oznaczać, że próbki gruntu użyte do badań tych samych gruntów cechują się znaczną niejednorodnością i mogą reprezentować ich istotnie różne odmiany.
4. Reasumując, można uznać, że analiza powtarzalności i odtwarzalności (*R&R*) może być pod pewnymi warunkami przydatnym narzędziem do porównawczej analizy różnych metod badawczych, w szczególności metod laboratoryjnego badania współczynnika filtracji gruntów. Jednakże koniecznym warunkiem stosowania takiej analizy jest spełnienie wymogu takiej samej liczności statystycznych prób w odniesieniu do badanych obiektów.

LITERATURA

- [1] Greber T.: *Analiza systemu pomiarowego (MSA)*. <http://www.statsoft.pl/czytelnia/jakosc/wprowadz.html>
- [2] Marciniak M., Przybyłek J., Herzig J., Szczepańska J.: *Laboratoryjne i terenowe oznaczanie współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych*. Wyd. Uniwersytetu im. A. Mickiewicza, Poznań 1998
- [3] Kaczyński R., Drągowski A., Krogulec E. i in.: *Współczynnik filtracji gruntów spoistych wyznaczony różnymi metodami*. „Aktualne problemy geologiczno-inżynierskich badań podłoża budowlanego i zagospodarowania terenu”. Mat. sem. Bogucki, Wyd. Nauk. S.C., Poznań 2000
- [4] Kaczyński R.: *Oznaczanie współczynników filtracji gruntów słabo przepuszczalnych, półprzepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych*. Przegląd Geolog., nr 10, 1969
- [5] Kaczyński R.: *Wykonanie analizy porównawczej wyników badań współczynnika przepuszczalności gruntów spoistych wyznaczonego różnymi metodami*. Archiwum ZPG UW i NFOŚiGW, Warszawa 1997 (niepublikowane)
- [6] Krogulec E.: *Wpływ metodyki badań na otrzymywane wartości współczynnika filtracji osadów słabo przepuszczalnych, cz. 2*. Przegląd Geolog., vol. 44, nr 11, 1996
- [7] PN-87/N-01052/13: *Badania statystyczne – Zasady wykrywania w próbkach wyników obciążonych błędami grubymi*. Polski Komitet Normalizacyjny, Miar i Jakości, Warszawa 1987
- [8] PN-98/B-02481: *Geotechnika – Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1998
- [9] PN-98/R-04033: *Gleby i utwory mineralne – Podział na frakcje i grupy granulometryczne*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1998
- [10] PN-ISO 3534-1: *Statystyka – Terminologia i symbole – Sekcja 3: Ogólne terminy dotyczące obserwacji i wyników badań*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002
- [11] PN-ISO 5725-1: *Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarów i wyników pomiarów – Część 1: Ogólne zasady i definicje*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002
- [12] Sałaciński T.: *SPC Statystyczne sterowanie procesami produkcji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Warszawa 2009
- [13] Sobczyk M.: *Statystyka*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1997
- [14] Tabisz R.: *Zapewnienie wiarygodności analizowanych danych – podstawy analizy MSA*. <http://www.statsoft.pl/czytelnia/jakosc/wprowadz.html>
- [15] Twardowski K. (red.), Bednarz S., Rzyczniak M.: *Podstawy metrologii w górnictwie nafty i gazu*. Wyd. AGH, Kraków 2009

- [16] Twardowski K., Drożdżak R., Glazor A.: *Analiza porównawcza pośrednich metod oceny współczynnika filtracji gruntów*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), t. 23/2, 2006
- [17] Twardowski K., Drożdżak R.: *Uwarunkowania dotyczące laboratoryjnych metod oznaczania wodoprzepuszczalności gruntów*. Wiertnictwo Nafta Gaz (półrocznik AGH), t. 24, z. 1, 2007
- [18] Volk W.: *Statystyka stosowana dla inżynierów*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973