

Kazimierz Twardowski*, Ryszard Drożdżak**

OCENA WPŁYWU MINERALIZACJI FILTRUJĄCEJ WODY NA MIERZONĄ PRZEPUSZCZALNOŚĆ OŚRODKÓW GRUNTOWYCH

1. UWAGI WSTĘPNE

Badanie gruntów, w szczególności spoistych stwarza poważne trudności metodyczne i techniczne, gdyż grunty, jako układy trójfazowe wykazują bardzo dużą zmienność właściwości fizycznych. Wynika z ich zróżnicowanego składu mineralnego oraz zwykle dużej wrażliwości na zmiany wilgotności. Wiąże się to z różną genezą gruntów spoistych, a także ich postsedymentacyjnymi przeobrażeniami, które doprowadziły m.in. do obecności w nich wysoce aktywnych minerałów ilastych z grupy smektytów, cechujących się labilną strukturą i dużymi zdolnościami sorpcyjnymi, także względem jonów.

Podstawowym parametrem geotechnicznym i petrofizycznym gruntów wykorzystywanym do ilościowego opisu przepływu w nich wody w oparciu o liniowe prawo filtracji Darcy'ego jest wodoprzepuszczalność (współczynnik filtracji, przewodność hydrauliczna, stała Darcy'ego) (Pazdro 1977, Pisarczyk 2001).

Wartości współczynnika filtracji (wodoprzepuszczalności) ośrodków gruntowych zależą zarówno od właściwości fizycznych ich szkieletu mineralnego (fazy stałej), jak również właściwości fizykochemicznych przepływającej cieczy. Wpływ właściwości szkieletu mineralnego rozpoznany jest w miarę dobrze, o czym świadczą parametry petrofizyczne gruntów (w szczególności porowatość i charakterystyki granulometryczne) uwzględnione we wzorach empirycznych wykorzystywanych do pośredniej oceny ich współczynnika filtracji.

W odniesieniu do wpływu właściwości przepływającej cieczy na parametry filtracyjne gruntów, standardowo uwzględniane są przede wszystkim ich charakterystyki mechaniczne

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków, były doktorant

– lepkość oraz gęstość (ciężar właściwy). Niewiele natomiast w literaturze fachowej spotkać można prac dotyczących wpływu chemizmu filtrującej cieczy, przede wszystkim wody, na charakterystyki procesu filtracji, w szczególności w ujęciu ilościowym.

Szczególne znaczenia w związku z tym zyskuje obroniona w 2011 roku na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie praca doktorska Ryszarda Drożdżaka pt. „Wpływ chemizmu filtrującej wody na mierzoną wartość przepuszczalności gruntów”. Głównym celem wykonanych i omawianych w niej badań było ilościowe określenie wpływu chemizmu filtrującej wody na mierzone w warunkach laboratoryjnych wartości współczynnika filtracji modelowych naturalnych słaboprzepuszczalnych gruntów.

Badania nawiązywały do zjawisk elektrokinetycznych, w szczególności do podwójnej warstwy elektrycznej (PWE), warunkującej wzrost lub spadek oporów przepływu, a co za tym idzie zmianę parametrów filtracyjnych gruntów, w tym przede wszystkim słaboprzepuszczalnych.

Wytypowane do badań naturalne grunty modelowe pochodziły z czwartorzędowych tarasów akumulacyjnych rzeki Raby. Zostały one wszechstronnie scharakteryzowane w oparciu o badania: granulometryczne, rentgenograficzne, sorpcyjne i elektrokinetyczne.

Własne badania laboratoryjne współczynnika filtracji (wodoprzepuszczalności) modeli gruntowych prowadzone były z wykorzystaniem przyrządu Kaczyńskiego (Drożdżak 2007; Kaczyński 1969) oraz odpowiednio dobranych roboczych wodnych roztworów typowych soli chlorkowych: NaCl i CaCl₂ oraz roztworów soli siarczanowych CaSO₄ i Al₂(SO₄)₃ (Macioszyk, Dobrzyński 2006).

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

W warunkach strefy saturacji (pełnego nasycenia wodą) na granicy faz ciało stałe (szkielet mineralny) – ciecz (wody podziemne) mogą gromadzić się ładunki elektryczne w wyniku: przejścia pewnych jonów z powierzchni ciała stałego do roztworu, adsorpcji wymiennej jonów z powierzchni ciała stałego z jonami roztworu, adsorpcji jonów potencjałotwórczych, orientacji dipoli czy dysocjacji grup powierzchniowych ciała stałego. Wskutek istnienia tego nadmiarowego ładunku powstaje na powierzchni międzyfazowej podwójna warstwa elektryczna (PWE) (Birdi 1997; Grabowska-Olszewska i in. 1980; Osipov i in. 2004; Twardowski 2010) (rys. 1).

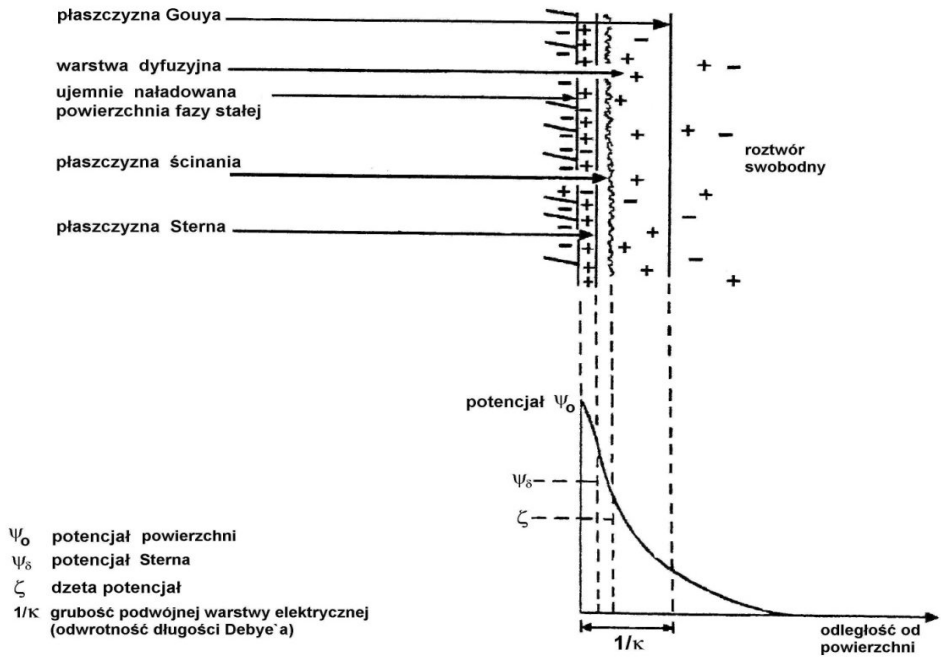
Złożoną budowę warstwy podwójnej uwzględnia teoria Sterna, która łączy pojęcia warstwy zwartej Helmholtza i warstwy rozmytej Gouya-Chapmana (rys. 1). Teoria warstwy rozmytej Gouya–Chapmana opiera się na równaniach Poissona i rozkładzie Maxwella–Boltzmann, ujmujących ilościowe zależności przestrzennego rozkładu potencjału elektrycznego i stężenia jonów w podwójnej warstwie elektrycznej. Przyjmuje się, że wszystkie parametry podwójnej warstwy są funkcjami odległości od powierzchni fazy stałej.

Pomijając złożone rozważania teoretyczne można do przybliżonej charakterystyki geometrycznej podwójnej warstwy elektrycznej wykorzystać tzw. odległość Debye'a–Hückela (długości Debye'a) κ wyrażoną wzorem (Birdi 1997):

$$\kappa = \left(\frac{2z^2 e^2 n_o}{\epsilon_r \epsilon_o kT} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

gdzie:

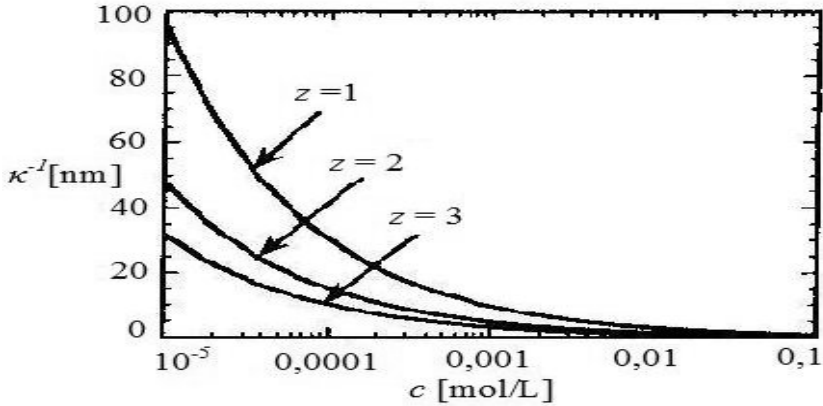
- k – stała Boltzmana,
- T – temperatura bezwzględna,
- e – ładunek elementarny,
- n_o – stężenie jonów wewnątrz roztworu,
- ϵ_r – stała dielektryczna (względna przenikalność dielektryczna) roztworu,
- ϵ_o – bezwzględna przenikalność dielektryczna próżni.



Rys. 1. Kontakt fazy stałej z roztworem wodnym soli z uwzględnieniem efektów mechanicznych i elektrycznych (Birdi 1997; Twardowski 2010)

Wielkość $1/\kappa$ ma wymiar długości i może być interpretowana jako przybliżona grubość warstwy rozmytej, a zatem i całej podwójnej warstwy elektrycznej.

Przybliżona grubość podwójnej warstwy elektrycznej w zależności od stężenia roztworu c oraz wartościowości przeciwjonów z przedstawia rysunek 2 (Berg 2010).



Rys. 2. Grubość podwójnej warstwy elektrycznej wyrażona jako odwrotność odległości Debye'a w funkcji stężenia roztworu oraz wartościowości przeciwnionów (Berg 2010)

Przybliżoną grubość PWE można wyrazić jako funkcję siły jonowej roztworu I – wzór (2):

$$I = 0,5 \sum m_i z_i^2 \quad (2)$$

gdzie (Dobrynin 1991; Macioszczyk, Dobrzyński 2007):

- I – siła jonowa roztworu [mol/L] lub [mol/kg],
- m_i – stężenie molarne lub molowe i -tego jonu, [mol/L] lub [mol/kg],
- z_i – ładunek (wartościowość) i -tego jonu.

Dla roztworów wodnych posiadających symetryczny elektrolit (np. NaCl) grubość PWE $\frac{1}{\kappa}$ przy 25 °C może być wyrażona:

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{0,304 \cdot 10^{-9}}{I^{0,5}} \quad (3)$$

gdzie I – siła jonowa.

Jak widać grubość PWE jest silnie zależna od siły jonowej I otaczającej cieczy. Im mniej zasolony roztwór, tym większa grubość PWE. Analogiczny wpływ na grubość podwójnej warstwy elektrycznej ma wartościowość jonu znajdującego się w roztworze. Jony o niższej wartościowości dają efekt grubszej warstwy wody fizycznie związanej.

Na podstawie powyższych rozważań określić można istotny wpływ warstwy wody fizycznie związanej, a więc i PWE na przepuszczalność porowatych gruntów. Im grubszą stanowi ona warstwę, tym wewnątrz poru pozostaje mniejsza wolna przestrzeń, przez którą mogą przemieszczać się płyny.

Należy zauważyć, że największe znaczenie ma położenie płaszczyzny ścinania, która oddziela ciecz hydrodynamicznie nieruchomą od cieczy swobodnej. Ciecz unieruchomiona

przez oddziaływanie ze ścianką poru, to warstwa wody silnie związanej, która w podwójnej warstwie elektrycznej stanowi warstwę Sterna. Natomiast na rysunku 1 obserwujemy na prawo od granicy ścinania warstwę wody słabo fizycznie związanej, stanowiącej warstwę dyfuzyjną PWE, którą można częściowo uruchomić poprzez zwiększanie wartości gradientu ciśnienia. Niektórzy badacze nazywają podwójną warstwę elektryczną warstwą ekranującą, ponieważ chroni ona roztwór swobodny od wpływu oddziaływania powierzchni ciała stałego (szkieletu mineralnego).

3. BADANIA LABORATORYJNE

Prezentowane w niniejszej pracy wyniki badań odnoszą się do warunków spełniających następujące podstawowe założenia:

- przepływy stacjonarne,
- grunty w stanie fizycznym pełnego nasycenia wodą (warunki naturalne – strefa saturacji),
- równowaga hydrogeochemiczna, tj. praktycznie bez istotnej roli procesów rozpuszczania lub/i wytrącania soli oraz braku wymiany jonowej.

W pracy wykorzystywane są aktualnie obowiązujące (a stosunkowo niedawno wprowadzone) podziały i klasyfikacje oraz informacje o normach dotyczących badań gruntów. W szczególności stosowane symbole literowe, oznaczenia oraz jednostki miar ujęte w:

- normie PN-98/B-02481: Geotechnika;
- wieloczęściowej normie PN-01/ISO 31: Wielkości fizyczne i jednostki miar;
- słowniku hydrogeologicznym (2002);
- wieloczęściowej normie PKN-CEN ISO/TS 17892: Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów (2009).

Podział gleb i utworów mineralnych na frakcje i grupy granulometryczne przedstawiony w normie gleboznawczej PN-98/R-04033 powinien być według niej stosowany w inżynierii środowiska, w szczególności w kształtowaniu i ochronie środowiska. Można go więc w związku z tym odnosić do wyodrębnionego przez normę geotechniczną PN-98/B-02481 działu geotechniki nazwanego „geotechniką środowiskową”.

Do badań laboratoryjnych jako grunty modelowe zdecydowano się wykorzystać po licznych testach materiały produkowane przez Zakłady Kruszywa w Nieznanowicach k/Krakowa.

Do badań współczynnika filtracji wykorzystano dwa rodzaje gruntów: grunt modelowy G8, który wg normy gleboznawczej PN-98/R-04033 scharakteryzowano jako pył, oraz grunt modelowy G30/70/8, który jest mieszaniną 30% obj. gruntu G8 oraz 70% obj. piasku drobnoziarnistego; wg normy gleboznawczej PN-98/R-04033 można scharakteryzować go jako piasek drobnoziarnisty gliniasty. Grunt ten cechuje się większą wodoprzepuszczalnością w stosunku do gruntu G8, a jednocześnie reprezentuje pod względem granulometrycznym i mineralogicznym właściwości gruntu słaboprzepuszczalnego (Marciniak i in. 1998).

Jednocześnie dla zapewnienia różnicowania eksperymentu pod względem petrofizycznym przeprowadzono badania wskaźnikowe współczynnika filtracji dla kolejnych 7 gruntów modelowych, będących mieszaninami gruntu G8 oraz piasku drobnoziarnistego w odpowiednich proporcjach. Reprezentowały one zarówno grunty o bardzo dobrych właściwościach filtracyjnych, jakim był piasek drobnoziarnisty, jak również grunty półprzepuszczalne reprezentowane przez gliny i pyły (Marciniak i in. 1998; PN-98/R-04033).

Badane grunty modelowe zostały scharakteryzowane w oparciu o badania: porowatości, granulometryczne, rentgenograficzne, sorpcyjne i elektrokinetyczne.

Charakterystyka petrofizyczna w odniesieniu do składu granulometrycznego wykorzystywanych gruntów została wykonana z wykorzystaniem Laserowego Analizatora Cząstek ANALYSETTE 22, badania składu mineralogicznego zostały wykonane przy pomocy dyfraktometru rentgenowskiego Philips X'Pert PW 2030. Badania sorpcyjne powierzchni właściwej gruntów wykonano metodą BET, natomiast do badań w celu oznaczenia potencjału elektrokinetycznego zeta (ζ) wykorzystano uniwersalny zetametr firmy MICROMERITICS, będący na wyposażeniu Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie.

Podstawowa charakterystyka petrofizyczna (porowatościowa i granulometryczna) badanych gruntów modelowych przedstawiona jest w tabeli 1.

Tabela 1

Petrofizyczna charakterystyka badanych gruntów modelowych

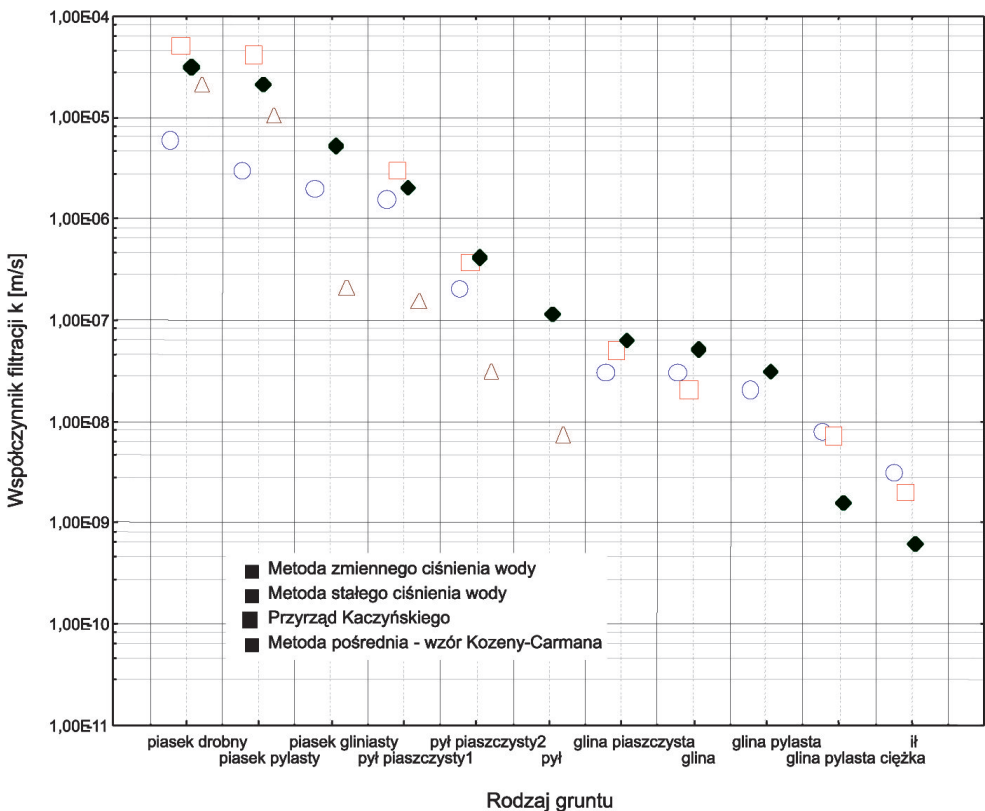
Rodzaj gruntu	Udział frakcji [%]		Porowatość otwarta	Współczynnik niejednorodności	Średnica efektywna	Nazwa wg PN-98/R-04033	Nazwa wg PN-EN ISO 14688-2
	G8	G100/0/8*	n_o [1]	U [1]	d_e [mm]		
G8	100	0	0,425	4,29	0,00793	pył	pył ilasty
G90/10/8	90	10	0,419	24,25	0,00879	pył	pył ilasty
G80/20/8	80	20	0,407	18,39	0,00987	pył piaszczysty	glina pylasta
G70/30/8	70	30	0,393	17,15	0,0112	pył piaszczysty	glina pylasta
G60/40/8	60	40	0,378	32,01	0,0131	glina	glina pylasta
G50/50/8	50	50	0,343	29,86	0,0155	glina	glina pylasta
G40/60/8	40	60	0,325	34,29	0,0192	glina piaszczysta	piasek zailony
G30/70/8	30	70	0,318	51,98	0,0261	piasek słabo-gliniasty	piasek zailony
G0/100/8	0	100	0,301	2,00	0,3764	piasek	piasek

*nazwa gruntu dotyczy piasku drobnoziarnistego

Własne badania laboratoryjne wykonywane były w oparciu o metodę i przyrząd Kaczyńskiego (Drożdżak 2007; Kaczyński 1969). Uzasadnione to było przyjętymi ze względu doświadczeń praktyczno-ekonomicznych przesłankami wyboru metody laboratoryjnej:

- pomiar współczynnika filtracji gruntów $k < 10^{-6}$ m/s,
- możliwość samodzielnego wykonania przyrządu pomiarowego,
- niezbyt wysokie koszty przeprowadzania pomiaru,
- porównywalność wyników uzyskanych innymi metodami.

Zestawienie porównawcze na rysunku 3 obejmuje wyniki dotyczące 11 różnego typu gruntów – od piasków poczynając poprzez pyły i gliny na ile kończąc. Generalnie wynika z niego dość dobra porównywalność wyników oznaczeń metodą Kaczyńskiego oraz klasycznymi metodami stałego i zmiennego ciśnienia wody. Nie udało się niestety określić przedziałowych ocen niepewności wyników ze względu na brak w źródłowym artykule koniecznych ilościowych danych. Tym niemniej szczegółowa analiza rysunku 3 pozwala sformułować określone istotne wnioski metodyczne.



Rys. 3. Zestawienie wartości współczynników filtracji dla różnych rodzajów gruntów uzyskanych różnymi metodami (Kaczyński 1969, ze zmianami)

W szczególności można stwierdzić, że:

- bardzo zbliżone wyniki do metod stałego i zmiennego ciśnienia wody uzyskuje się w przypadku pyłów piaszczystych, pyłów oraz glin,
- dla piasków drobnoziarnistych i pylastych obserwuje się bardzo zbliżone wyniki w odniesieniu do metody stałego ciśnienia wody, a także do pośredniej metody opartej na wzorze Kozeny-Carmana,
- wyraźnie odbiegające i zaniżone wyniki uzyskuje się w przypadku bardzo słaboprzepuszczalnych gruntów ilastych (gliny pylastej ciężkiej oraz iłu) o zawartości frakcji iłowej ($<0,002 \text{ mm} = 2 \text{ }\mu\text{m}$) powyżej 20% (odpowiednio 23% oraz aż 46,5%) przy wartościach współczynnika filtracji odpowiednio około 2,10–8 m/s oraz około 6,10–10 m/s.

Dla celów porównawczych wykonano weryfikacyjne badania w odniesieniu do gruntów modelowych za pomocą metody FLOW-PUMP na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie oraz dodatkowe badania z wykorzystaniem uniwersalnego przepuszczalnościomierza Temco w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie.

Do badań zmian współczynnika filtracji pod wpływem zróżnicowania chemizmu wody użyte zostały najczęściej występujące w wodach podziemnych sole chlorkowe oraz siarczanowe (Macioszczyk i in. 2006; Macioszczyk, Dobrzyński 2007). Do przeprowadzenia eksperymentu zostały użyte roztwory chlorku sodu NaCl, potocznie zwanego „solą kuchenną”, chlorku wapnia CaCl_2 oraz siarczanu glinu $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Równocześnie do badań wskaźnikowych został użyty dodatkowo roztwór wodny siarczanu wapnia CaSO_4 (Marciniak i in. 1998).

Pomiary przeprowadzono dla zróżnicowanych stężeń roztworów, tak aby dobór stężeń w przybliżeniu odzwierciedlał podział wód podziemnych ze względu na mineralizację, od wód słodkich aż po wody słone i solanki (Alekin 1970; Macioszczyk i in. 2006): dla czterech stężeń roztworów: 3 mol/L, 1 mol/L, 0,1 mol/L oraz 0,01 mol/L.

4. MODELOWANIE STATYSTYCZNE

W praktyce badań z zakresu nauk o ziemi, w szczególności geologii inżynierskiej, istnieją różne podejścia do rozwiązywania zadań modelowania i prognozowania, do najczęściej wykorzystywanych zaliczyć możemy (Twardowski red. 1997):

- podejście arbitralne – opierające się na wykorzystaniu zasady analogii i doświadczenia interpretatora,
- podejście deterministyczne – oparte na założeniu o możliwości jednoznacznego i ścisłego opisu systemu za pomocą związków przyczynowo-skutkowych, mających charakter praw fizycznych,
- podejście statystyczne – opierające się na założeniu o złożoności systemu oraz praktycznej niemożności jego opisu za pomocą ścisłych funkcjonalnych związków i w efekcie na stochastycznym charakterze przejawiania się ustalonych prawidłowości, przy uznaniu ich przyczynowych uwarunkowań.

Za uzasadnieniem podejścia statystycznego przemawiają następujące ogólnie znane fakty:

- badane systemy przyrodnicze w większości przypadków zależą od dużej liczby przyczyn-czynników i wymagają dla ich opisu wielu ilościowych i jakościowych wskaźników, odzwierciedlających te przyczynowo-skutkowe związki,
- wartości określonych ilościowych wskaźników w większości przypadków wynikają z działania nie jednego, ale szeregu czynników, będących z sobą w różnych czasowych i przestrzennych związkach,
- dla złożonych dynamicznych procesów geologiczno-przyrodniczych jednoznaczny opis deterministyczny z reguły jest praktycznie niemożliwy, co wynika z niedostatecznej znajomości charakteru i mechanizmu poszczególnych warunkujących go zjawisk,
- mierzone w procesie badania systemu jego ilościowe parametry, w szczególności geologiczne i geofizyczne, cechują się w praktyce zawsze mniejszym lub większym stopniem nieokreśloności, związanym z niepewnościami i błędami wyników pomiarów i końcowych ocen ilościowych.

W końcowym etapie prac badawczych zasadniczym ich celem była konstrukcja (identyfikacja) wielowymiarowego modelu statystycznego umożliwiającego poprawne prognozowanie (predykcję) oryginalnego parametru k_{st}^w , nazwanego względny standardyzowanym współczynnikiem filtracji. Traktowany formalnie jako zmienna prognozowana (objaśniana Y), w analizie regresji zdefiniowany został wg wzoru:

$$k_{st}^w = \frac{k}{k_{st}} \quad (4)$$

gdzie:

- k – współczynnik filtracji wyznaczony dla dowolnego wodnego roztworu soli,
- k_{st} – standardowy współczynnik filtracji wyznaczony dla wodnego roztworu soli 0,01 nCaSO₄.

Wodny roztwór 0,01n CaSO₄ został przyjęty jako standardowy do ilościowych ocen porównawczych ze względów praktycznych, wynika to z badań literaturowych, które rekomendują stosowanie w badaniach laboratoryjnych 0,01n CaSO₄ jako standardowego medium, zamiast wody destylowanej. Tłumaczy to fakt, że związek ten nie powoduje wymywania składników rozpuszczonych z badanej próbki, a także ogranicza procesy wymiany jonowej (Marciniak i in. 1998; U.S. EPA 1980).

Jak widać z powyższego wzoru można się doszukiwać pewnych analogii do względnego współczynnika przepuszczalności skał, podstawowego parametru filtracyjnego ośrodków porowatych, wykorzystywanego w inżynierii naftowej i gazowniczej.

Jako zmienne prognozujące (objaśniające X_i) w analizie regresji wykorzystywano:

- stężenie molarne lub molowe i -tego jonu w wodnym roztworze soli m_i , [mol/L] lub [mol/kg],
- ładunek (wartościowość) i -tego jonu z_i , [1],
- porowatość otwartą ośrodka gruntowego n_o , [1],
- średnicę efektywną ziarn tegoż ośrodka d_e , [mm].

W celu wyrażenia chemizmu wodnego roztworu jedną zmienną wykorzystano parametr siły jonowej roztworu I , zdefiniowany wcześniej wzorem (2). Z punktu widzenia fizykochemii siłę jonową roztworu I można traktować jako miarę siły pola elektrostatycznego wywołanego przez wszystkie jony znajdujące się w danym roztworze.

Za końcowy poprawny i najbardziej efektywny statystyczny model regresyjny do prognozowania względnego parametru k_{st}^w uznano model opisany wieloraką regresją wielomianową, wyrażony równaniem (Drożdżak 2011):

$$k_{st}^w = -1,9828 + 0,0020 * I^2 - 0,0224 * I - 20,9696 * n_o^2 + 16,6112 * n_o - 0,0763(\log_e d_e)^2 \quad (5)$$

(0,2957) (0,0001) (0,0018) (1,9887) (1,6360) (0,0196)

Wskaźniki statystyczne dotyczące tegoż równania to:

- liczebność wykorzystanej próby $n = 283$,
- współczynnik korelacji wielokrotnej nieliniowej $R = 0,796$,
- współczynnik determinacji $R^2 = 0,634$,
- błąd standardowy resztowy estymacji $S_y = 0,0325$.

Końcowe wyniki regresji w celu predykcji względnego standaryzowanego współczynnika filtracji k_{st}^w wskazują, że parametr odpowiadający za chemizm roztworu – siła jonowa I wyjaśnia aż około 44% zmienności, następnie porowatość no około 17%, zaś parametr $\log_e d_e$ wyjaśnia tylko około 2% zmienności.

5. WNIOSKI

- 1) Ilościową analizę wyników badań prowadzono z wykorzystaniem w szerokim zakresie metod statystycznych, w szczególności metod analizy korelacji i regresji, w tym klasycznej liniowej parzystej i wielorakiej, jak również krokowej segmentowej oraz wielomianowej. Analizy wykonano w oparciu o ogólnie dostępny pakiet komputerowy STATISTICA PL 8.
- 2) W celu wyznaczenia poprawki uwzględniającej wpływ chemizmu filtrującej wody mierzone wartości współczynnika filtracji badanych gruntów wprowadzono tzw. względny standaryzowany współczynnik filtracji k_{st}^w , zdefiniowany jako stosunek wartości współczynnika filtracji uzyskanej dla danego roztworu do wartości zmierzonej z wykorzystaniem standardowego wodnego roztworu 0,01n CaSO₄.
- 3) W ramach analizy korelacyjno-regresyjnej jako zmienną prognozowaną (objaśnianą) przyjmowano powyżej zdefiniowany względny standaryzowany współczynnik filtracji k_{st}^w . Jako zmienne prognozujące (objaśniające) wykorzystywano zarówno charakterystyki petrofizyczne gruntów (średnicę efektywną d_e i porowatość odkrytą n_o), jak również parametry opisujące chemizm wykorzystywanych w badaniach roboczych roztworów wodnych, wyrażone w szczególności w formie ich siły jonowej I .

- 4) Podsumowując, można stwierdzić, że generalnie udało się uzyskać pozytywne wyniki dotyczące założonych celów prowadzonych badań oraz potwierdzających ich teoretyczne podstawy. Można to uznać za sukces biorąc pod uwagę fakt, że badania współczynnika filtracji słaboprzepuszczalnych gruntów cechują się znacznymi trudnościami metodycznymi.
- 5) Jako najważniejszy i zasadniczy wynik pracy o charakterze użytkowym należy uznać modelowe równanie, opisujące zależność zmiany względnego standaryzowanego współczynnika filtracji gruntu k_{stw} od właściwości petrofizycznych badanych gruntów oraz chemizmu wykorzystywanych do badań roboczych roztworów wodnych soli. Wykorzystując powyższe równanie można w dość prosty i szybki sposób określić poprawkę dotyczącą wartości mierzonego współczynnika filtracji gruntów w zależności od chemizmu wykorzystywanej do badań cieczy roboczej. Pozwoli to na oszczędność czasu i finansów związanych z badaniami laboratoryjnymi współczynnika filtracji gruntów słaboprzepuszczalnych, gdyż jak wiemy tego typu badania są kosztowne i pracochłonne.

LITERATURA

- [1] Berg J.C.: *An introduction to interfaces & colloids: the bridge to nanoscience*. World Scientific, New Jersey 2010.
- [2] Birdi K.S.: *Handbook of surface and colloid chemistry*. CRS Press, Boca Raton/New York 1997.
- [3] Dobrynin V.M., Vendelštejn B.J., Kozevnikov D.A.: *Petrofizika*. Izd. "Nedra", Moskwa 1991.
- [4] Drożdżak R.: *Przyrząd i metoda Kaczyńskiego do oznaczania współczynnika filtracji gruntów*. Zesz. Nauk. AGH, Ser., Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 24, z. 1, 2007.
- [5] Drożdżak R.: *Wpływ chemizmu filtrującej wody na mierzoną wartość przepuszczalności gruntów*. Wyd. Wiertn. Nafty i Gazu, Kraków 2011 (niepublikowana praca doktorska).
- [6] Grabowska-Olszewska B. (red. nauk.): *Metody badań gruntów spoistych*. Wyd. Geolog., Warszawa 1980.
- [7] Kaczyński R.: *Oznaczanie współczynników filtracji gruntów słabo przepuszczalnych, półprzepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych*. Przegląd Geologiczny, nr 10, Warszawa 1969.
- [8] Macioszczyk A. (red. nauk.): *Podstawy hydrogeologii stosowanej*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2006.
- [9] Marciniak M., Przybyłek J., Herzig J., Szczepańska J.: *Laboratoryjne i terenowe oznaczanie współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych*. Wyd. Uniw. im. A. Mickiewicza, Poznań 1998.
- [10] Osipov V.I., Sokolov V.N., Eremeev V.V.: *Clay seals of oil and gas deposits*. A.A. Balkema Publishers, Lisse/Abingdon/Exton (Pa)/Tokyo 2004.

- [11] Pazdro Z.: *Hydrogeologia ogólna*. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1977.
- [12] Pisarczyk S.: *Gruntoznawstwo inżynierskie*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2001.
- [13] Słownik hydrogeologiczny (red. nauk.): Dowgiałło J., Kleczkowski A.S., Maciosz-czyk T., A. Różkowski). Wyd. PIG, Warszawa 2002.
- [14] Twardowski K. (red.): *Ocena metanonośności węgla kamiennych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego na podstawie wyników pomiarów otworowych*. Wyd. Centrum PPGSMiE PAN, Kraków 1997.
- [15] Twardowski K.: *Wybrane właściwości fizyczne gruntów*. Wyd. AGH, Kraków 2010.
- [16] U.S. Environmental Protection Agency: Test method for the permeability of compacted clay. (Constant elevated method); SW-870, Appendix III. Washington D.C. 1980.

Normy:

- [17] PN-86/B-02480: *Grunty budowlane – Określenia, symbole, podział i opis gruntów*.
- [18] PN-98/B-02481: *Geotechnika – Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar*.
- [19] PN-B-02481: *Terminy, symbole literowe, jednostki miary i definicje podstawowych właściwości gruntów*. 1998.
- [20] PN-98/R-04033: *Gleby i utwory mineralne – Podział na frakcje i grupy granulometryczne*.
- [21] PN-01/ISO 31-0: *Wielkości fizyczne i jednostki miar – Zasady ogólne*.
- [22] PN-01/ISO 31-11: *Wielkości fizyczne i jednostki miar – Znaki i symbole matematyczne do stosowania w naukach fizycznych i technice*.
- [23] PKN-CEN ISO/TS 17892: *Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 2*.