

Określanie parametrów transportu roztworów soli w glebie metodą laboratoryjną

Wstęp

Obecnie istotne znaczenie w ochronie środowiska ma poznanie mechanizmów ruchu wody wraz z rozpuszczonymi w niej substancjami. Szczególnie dotyczy to terenów użytkowanych rolniczo, na których stosuje się szereg związków chemicznych, takich jak, nawozy sztuczne i środki ochrony roślin. Substancje te mogą łatwo rozpuszczać się w wodzie i następnie wraz z nią przepływać przez ośrodek glebowy do wód powierzchniowych i podziemnych, powodując ich zanieczyszczenie. Procesy migracji związków chemicznych wraz z wodą są często opisywane za pomocą równań matematycznych, które są dobrym narzędziem do prognozowania kierunków i szybkości przemieszczania się związków chemicznych wraz z wodą na terenach, gdzie może zachodzić potencjalne zagrożenie jakości wód. Jednak praktyczne zastosowanie tych równań (modeli matematycznych) wymaga określenia parametrów opisujących transport wody i rozpuszczonych w niej substancji w ośrodku glebowym. Jednym z możli-

wych sposobów ich określenia jest pomiar w warunkach laboratoryjnych w kolumnach glebowych.

Celem niniejszego artykułu jest porównanie parametrów migracji roztworów soli w środowisku glebowym uzyskanych na podstawie trzech różnych rozwiązań analitycznych równania dyspersji hydrodynamicznej oraz ocena różnych metod opracowywania danych pomiarowych do wyznaczania tych parametrów. Wyniki uzyskano na podstawie dwóch typów eksperymentów laboratoryjnych przeprowadzonych w warunkach saturacji na sztucznie formowanych kolumnach z dwóch utworów glebowych: piasku luźnego i pyłu.

Rozwiązania analityczne równania dyspersji hydrodynamicznej

Ogólne równanie dyspersji substancji nie podlegającej rozpadowi w wodzie glebowej z uwzględnieniem zjawiska adsorpcji i desorpcji ma następującą postać:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Theta C + \rho S) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Theta D \frac{\partial C}{\partial x} - q C \right) \quad (1)$$

gdzie:

t – czas [T],

C – stężenie substancji rozpuszczonej w wodzie odniesione do objętości gleby [$M L^{-3}$],

Θ – wilgotność objętościowa gleby [$L^3 L^{-3}$],

ρ – gęstość gleby [$M L^{-3}$],

S – stężenie substancji w fazie stałej gleby (adsorbencie) [$M M^{-1}$],

x – współrzędna [L],

D – uśredniony w przekroju próbki gleby współczynnik dyspersji [$L^2 T^{-1}$],

q – jednostkowe natężenie przepływu wody przez przekrój próbki gleby [$L^3 T^{-1} L^{-2}$].

Prędkość adsorpcji związana jest ze zjawiskiem przechodzenia cząstek substancji z roztworu (adsorbentu) na powierzchnię ciała stałego (adsorbentu) i zależy od właściwości fizyczno-chemicznych adsorbentu i adsorbentu, temperatury i stężenia. Zjawisko to opisuje się równaniem izotermy. Często zakłada się, że między wielkościami S i C istnieje zależność w postaci następującej izotermy liniowej (Jury i inni 1991):

$$S = k C \quad (2)$$

gdzie k jest współczynnikiem empirycznym [$L^3 M^{-1}$].

Przy założeniu, że izoterma opisana jest liniowym (linearyzowanym) równaniem (2) oraz w jednorodnym profilu glebowym odbywa się ustalony przepływ wody (θ) i q stałe w przestrzeni i w

czasie) to równanie (1) sprowadza się do postaci:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

gdzie współczynnik zatrzymania (R) wyraża się wzorem (van Genuchten i Wierenga 1986):

$$R = 1 + \frac{\rho k}{\theta} \quad (4)$$

W przypadku braku interakcji pomiędzy związkami chemicznymi i glebą współczynnik k przyjmuje wartość zero, a współczynnik R jest równy jedności. Występująca w równaniu (3) średnia prędkość przepływu wody w porach (v) wyznaczana jest ze wzoru:

$$v = \frac{\rho}{\theta} \quad (5)$$

W celu ułatwienia interpretacji wyników krzywych przejścia wykorzystuje się pojęcie czasu względnego (T) i stężenia względnego (C_e), które są zdefiniowane wzorami (van Genuchten i Wierenga 1986):

$$T = \frac{vt}{L} \quad (6)$$

$$C_e(L, t) = \frac{C(L, t) - C_i}{C_0 - C_i} \quad (7)$$

gdzie:

v – średnia prędkość przepływu wody w porach [$L T^{-1}$],

t – czas [T],

L – długość kolumny glebowej [L],

$C(L,t)$ – stężenie substancji w punkcie $x = L$ i czasie t [$M L^{-3}$],

C_i – stężenie początkowe roztworu (stężenie tła) [$M L^{-3}$],

C_0 – stężenie roztworu zadawanego (iniekwane) w przekroju $x = 0$, ($C_0 > C_i$) [$M L^{-3}$].

Czas względny związany jest z objętością wody w kolumnie glebowej, a w warunkach pełnego nasycenia z objętością porów. Wartość $T = 1$ odpowiada całkowitemu wyparciu wody (roztworu) z kolumny glebowej.

W większości rozważań dotyczących określania parametrów transportu roztworu w kolumnie glebowej wprowadza się liczbę podobieństwa Pecleta dla kolumny (P), którą definiuje się jako (van Genuchten i Wierenga 1986):

$$P = \frac{vL}{D} \quad (8)$$

Określenie współczynnika dyspersji i współczynnika zatrzymania w warunkach laboratoryjnych odbywa się przez porównanie wyników pomiarów krzywej przejścia w kolumnie glebowej o skończonej długości, przez którą filtruje roztwór z wynikami obliczeń krzywej uzyskanymi na podstawie rozwiązań analitycznych równania dyspersji.

W niniejszym artykule wykorzystano trzy najczęściej spotykane rozwiązania równania dyspersji (3) dla ustalonego jednowymiarowego strumienia opisujące migrację substancji ulegających sorpcji.

Po wprowadzeniu liczby Pecleta, czasu względnego i stężenia względnego, rozwiązanie podane przez Lapidusa i Amundsona (1952) oraz Ogatę i Banksa (1961) za van Genuchtenem i Alvesem (1982) (A-1) dla warunku początkowego:

$$C(x,0) = C_i \quad (9)$$

i warunków brzegowych:

$$C(0,t) = \begin{cases} C_0 & 0 < t \leq t_0 \\ C_i & t > t_0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(\infty, t) = 0$$

przyjmuje formę:

$$C_e(L,T) = \begin{cases} A(L,t) & 0 < t \leq t_0 \\ A(L,T) - A(L,T - T_0) & t > t_0 \end{cases} \quad (11)$$

gdzie:

$$A(L,T) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{P}{4RT} \right)^{0.5} (R - T) \right] + \frac{1}{2} \exp(P) \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{P}{4RT} \right)^{0.5} (R + T) \right] \quad (12)$$

Rozwiązanie podane przez: Masona i Weavera (1924), Lindstroma i innych (1967) oraz Gershona i Nira (1969) za van Genuchtenem i Alvesem (1982) (A-2) dla warunku początkowego:

$$C(x,0) = C_i \quad (13)$$

i warunków brzegowych:

$$\left(-D\frac{\partial C}{\partial x} + vC\right)_{x=0} = \begin{cases} vC_0 & 0 < t \leq t_0 \\ vC_i & t > t_0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(\infty, t) = 0$$

przyjmuje formę:

$$C_e(L, T) = \begin{cases} A(L, T) & 0 < t \leq t_0 \\ A(L, T) - A(L, T - T_0) & t > t_0 \end{cases} \quad (15)$$

gdzie:

$$A(L, T) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{P}{4RT} \right)^{0.5} (R - T) \right] +$$

$$+ \left(\frac{PT}{\pi R} \right)^{0.5} \exp \left[-\frac{P}{4RT} (R - T)^2 \right]$$

$$- \frac{1}{2} \left(1 + P + \frac{PT}{R} \right) \exp(P) \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{P}{4RT} \right)^{0.5} (R + T) \right]$$

(16)

Bardzo często wykorzystuje się uproszczoną formę (A-0) rozwiązania A-1 (van Genuchtena i Wierenga 1986; Smettema 1991) w postaci:

$$C_e(L, T) = \begin{cases} A(L, T) & 0 < t \leq t_0 \\ A(L, T) - A(L, T - T_0) & t > t_0 \end{cases} \quad (17)$$

gdzie:

$$A(L, T) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{P}{4RT} \right)^{0.5} (R - T) \right] \quad (18)$$

Występująca w wyżej wymienionych wzorach wartość T_0 jest względnym czasem trwania pulsu i określona jest jako:

$$T_0 = \frac{vt_0}{L} \quad (19)$$

gdzie:

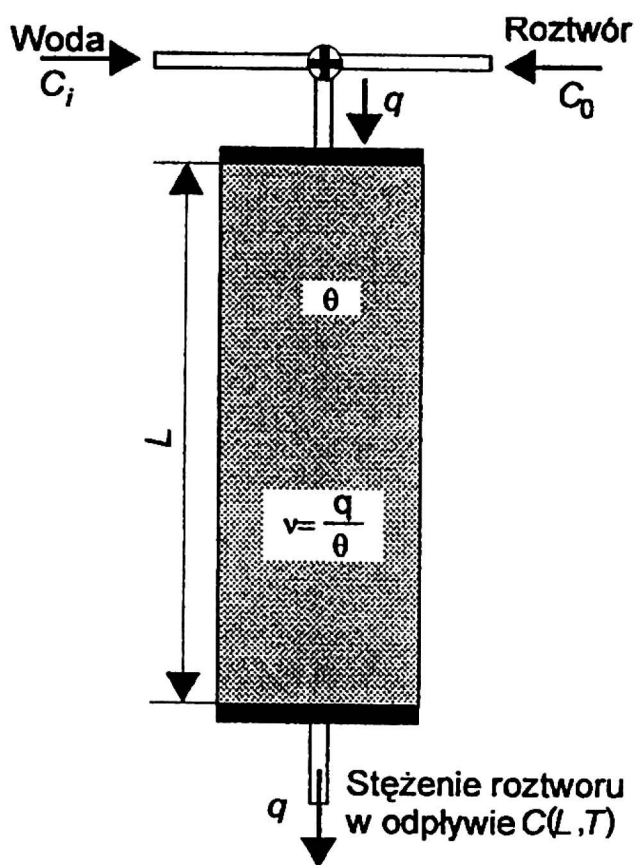
t_0 – czas trwania pulsu [T].

Rozwiązania A-1 i A-2 zostały podane dla różnych typów górnych warunków brzegowych. W przypadku rozwiązania A-1 jest to warunek brzegowy I rodzaju, a w przypadku A-2 warunek brzegowy III rodzaju.

Metodyka badań

Laboratoryjne badania parametrów dyspersji i sorpcji przeprowadzono w sztucznie formowanej, pionowej kolumnie glebowej o średnicy 7 cm i długości 45 cm, dla dwóch utworów: piasku luźnego i pyłu. W zależności od sposobu iniekcji roztworu przeprowadzono dwa typy eksperymentów: front i puls. Schemat eksperymentu przedstawiono na rysunku 1.

W eksperymentach typu front kolumnę nasycano stopniowo od dołu wodą destylowaną (o stężeniu tła $C_i=0$ mol KCL) w celu nie dopuszczenia do jej zapowietrzenia. W chwili $T=0$ otwierano swobodny odpływ na dole kolumny a



RYSUNEK 1. Schemat eksperymentu

jednocześnie, doprowadzano roztwór o znanym stężeniu do jej powierzchni przy pomocy butli Mariotta. We wszystkich eksperymentach stosowano stężenie roztworu $C_0 = 1$ mol KCl (wyjątek stanowił eksperyment PYŁ-2F, w którym zastosowano stężenie $C_0 = 0,2$ mol KCl). Przefiltrowany roztwór pobierano w sposób ciągły do naczyń o pojemności 50 ml lub 25 ml. Zawartość chlorków w roztworze tła na wejściu i wyjściu z kolumny określano metodą konduktometryczną. Ponieważ eksperymenty przeprowadzono w różnych temperaturach wykonane pomiary przewodnictwa elektrycznego sprowadzono do temperatury 25°C uwzględniając odpowiednie poprawki. Pomierzone wartości przewodnictwa ele-

ktrycznego ($\text{milimhos} \cdot \text{cm}^{-1}$) roztworu posłużyły do określenia stężenia względnego C_e .

Eksperymenty typu puls przeprowadzono podobnie jak typu front. Różnicę stanowił sposób zadawania stężenia roztworu na powierzchni kolumny. Na wejściu zadawano jednorazowo pipetą roztwór o stężeniu C_0 o objętości $3,84 \text{ cm}^3$, co w przeliczeniu na jednostkę powierzchni stanowił 1 mm wysokości słupa roztworu (wyjątkiem był eksperyment PYŁ-2P, gdzie objętość zadawanego roztworu wynosiła $11,52 \text{ cm}^3$). Następnie za pomocą butli Mariotta w sposób ciągły zadawano roztwór o stężeniu tła C_i .

Ogółem przeprowadzono po cztery eksperymenty dla każdego utworu glębowego – dwa typu puls i dwa typu front.

Analiza wyników pomiarów

Eksperymenty typu front. W celu określenia parametrów dyspersji na podstawie zarejestrowanych krzywych przejścia wykorzystano dwie metody: graficzną i optymalizacji. W metodzie graficznej (van Genuchten i Wierenga 1986) zastosowano następującą procedurę:

- zarejestrowane wyniki pomiarów krzywych przejścia nanoszono na wykres stosując podziałkę logarytmiczną dla czasu względnego (T) i podziałkę prawdopodobieństwa rozkładu normalnego dla stężenia względnego (C_e),
- punkty pomiarowe wyrównywano linią prostą i określono jej współczyn-

nik kierunkowy (α) dla zakresu stężenia względnego 0,20–0,80,

- wartość liczby Pecleta określano ze wzoru:

$$P = 4\alpha^2 - \Delta \quad (20)$$

gdzie:

Δ – poprawka zależna od rozwiązania analitycznego i zakresu stężeń wykorzystywanego do określania (dla rozwiązań A-1, A-2 i A-0 poprawka wynosiła odpowiednio 0,5, 0,9 i 0,07),

- na podstawie wartości liczby podobieństwa Pecleta określono stężenie względne (C_e) po przepłynięciu objętości roztworu (R) równej objętości porów w kolumnie glebowej (rys. 2),
- znając wielkość $C_e(R)$ i wiedząc, że $\ln(T) \equiv \ln(R)$ z wykresu log-normalnego krzywej przejścia określano wielkość R .

Parametry dyspersji określone metodą graficzną przedstawiono w tabeli 1.

Metoda optymalizacji polegała na minimalizacji sumy odchyłeń kwadratów (SSQ) wielkości stężenia względnego pomierzonego i obliczonego zgodnie z formułą:

$$SSQ = \sum_{i=1}^{i=n} [C_e(L, T_i) - C(L, T_i)]^2 \quad (21)$$

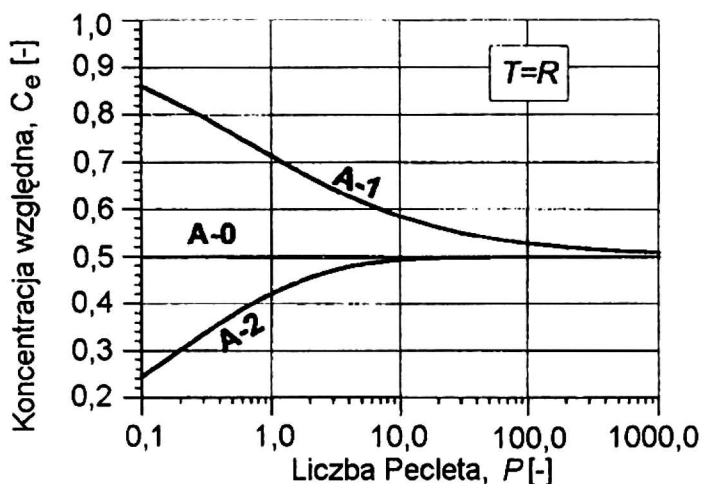
gdzie:

$C_e(L, T_i)$ – pomierzone stężenie względne dla czasu względnego T_i [–],

$C(L, T_i)$ – obliczone stężenie względne dla czasu względnego T_i [–],

n – liczba punktów pomiarowych [–].

W metodzie tej dążono do minimalizacji SSQ przez zadawanie różnych war-



RYSUNEK 2. Wpływ liczby podobieństwa Pecleta na stężenie względne roztworu po przepłynięciu R objętości porów ($T = R$) dla rozpatrywanych rozwiązań analitycznych (van Genuchten i Wierenga 1986)

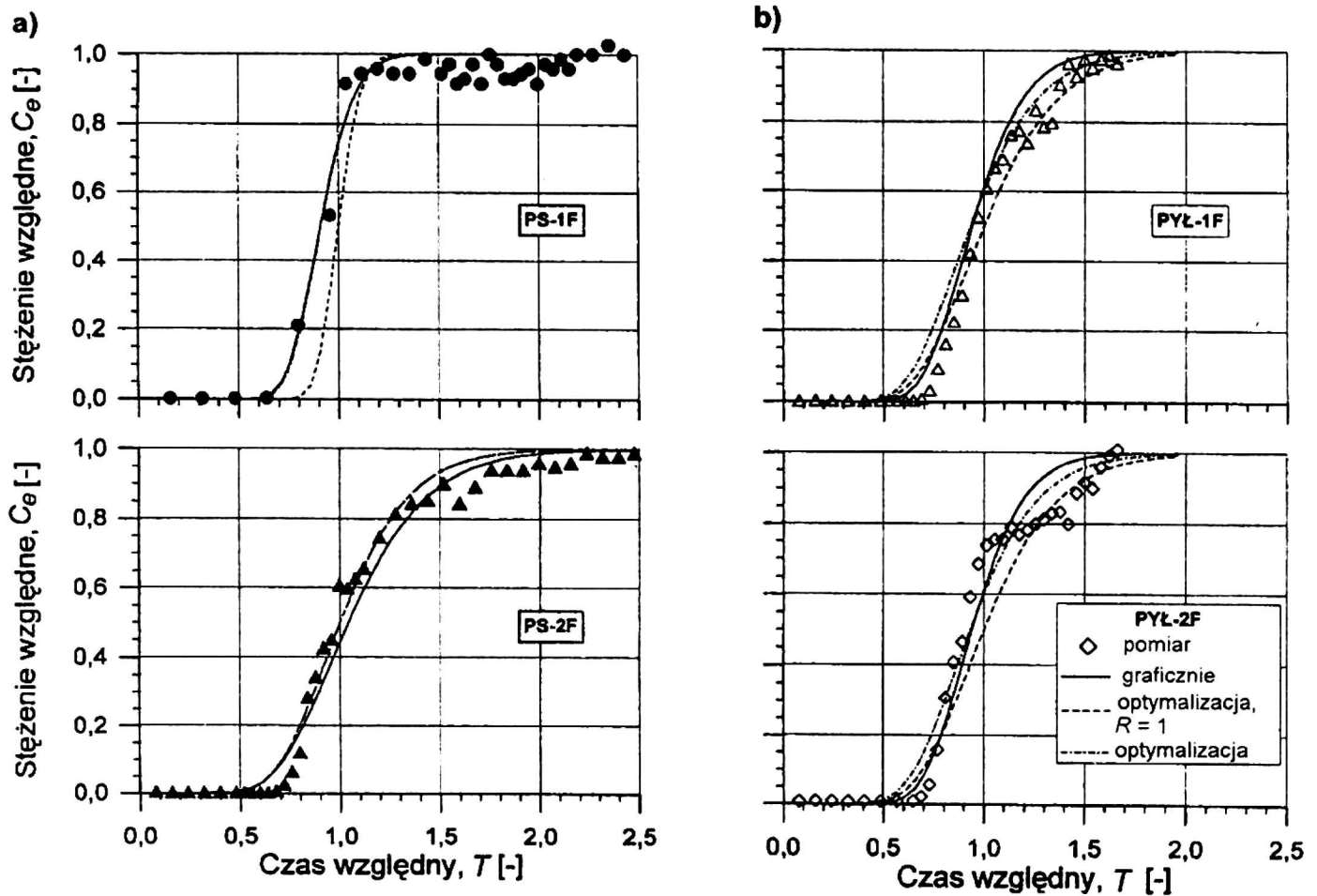
tości wielkości poszukiwanych w tym przypadku P i R . Poszukiwania parametrów dyspersji za pomocą metody optymalizacji przeprowadzono wykorzystując dwie grupy obliczeń: optymalizację, w której wielkością poszukiwaną była tylko liczba podobieństwa Pecleta (P) zakładając, że współczynnik zatrzymania $R = 1$ oraz optymalizację, w której poszukiwano wartości optymalnych dla P i R . Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 można stwierdzić, że najlepsze dopasowanie wyników obliczeń krzywych przejścia do wyników pomiarów (zakładając jako kryterium wartość SSQ) uzyskano przy zastosowaniu metody optymalizacji, w której poszukiwano wartości optymalnych dla P i R . Znacznie słabsze dopasowanie uzyskano na podstawie optymalizacji, w której założono $R = 1$, jak i na podstawie metody graficznej, w której wyrównanie krzywej przejścia jest stosunkowo subiektywne. We

TABELA 1. Parametry dyspersji określone metodą graficzną i optymalizacji dla różnych rozwiązań analitycznych na podstawie pomierzonych krzywych przejścia w eksperymentach typu front

Parametry	Metoda graficzna				Optymalizacja, R=1				
	rozwiązania				rozwiązania				
	A-0	A-1	A-2	A-0	A-1	A-2	A-0	A-1	A-2
Eksperyment PL-1F									
P	62,9	62,4	92,0	266,2	110,2	266,6	100,6	96,9	96,9
R	0,909	0,924	0,909	1,00	1,00	1,00	0,914	0,918	0,914
D	3 722,0	3747,8	2 542,6	879,2	2 123,8	877,9	2 326,4	2 415,3	2 415,3
λ	0,717	0,722	0,490	0,169	0,409	0,169	0,448	0,465	0,465
SSQ	86,94	87,00	78,50	211,81	191,99	211,87	78,07	78,54	78,10
Eksperyment PL-2F									
P	23,0	22,6	22,2	27,7	33,7	26,6	27,7	28,4	26,6
R	1,041	1,094	1,041	1,00	1,00	1,00	1,00	1,030	1,000
D	11 342,2	11 558,9	11 767,0	9 437,8	7 757,5	9 828,1	9 437,8	9 205,2	9 828,1
λ	1,957	1,994	2,030	1,628	1,338	1,695	1,628	1,588	1,695
SSQ	115,18	125,03	117,68	85,99	108,29	85,94	85,99	86,30	85,94
Eksperyment PYŁ-1F									
P	48,4	47,9	47,5	37,5	39,4	36,7	37,5	36,8	36,5
R	0,987	1,012	0,987	1,00	1,00	1,00	0,994	1,020	0,992
D	527,0	531,8	536,2	679,7	646,9	694,5	679,7	692,6	698,3
λ	0,933	0,941	0,949	1,203	1,145	1,229	1,203	1,226	1,236
SSQ	67,83	66,68	67,94	56,15	64,56	56,48	54,55	54,24	54,50
Eksperyment PYŁ-1F									
P	43,9	43,5	43,1	24,6	22,6	24,1	26,5	25,9	25,5
R	0,42	0,973	0,942	1,00	1,00	1,0	0,933	0,969	0,932
D	591,1	597,0	602,5	1 054,4	1 147,7	1 076,3	978,8	1 001,5	1 017,2
λ	1,028	1,038	1,048	1,833	1,996	1,871	1,702	1,741	1,769
SSQ	197,37	207,68	198,21	267,32	171,22	272,50	152,56	151,65	152,56

P [-]; R [-]; D [cm d⁻²]; λ [cm]; SSQ – suma odchyłeń kwadratów *10⁻³ [-]



RYSUNEK 3. Pomierzone i wyrównane krzywe przejścia dla eksperymentu typu front na kolumnach: a – piasek luźny, b – pył

wszystkich przypadkach określona liczba Pecleta była większa od 20. Oznacza to, że eksperymenty odbywały się w reżimie czystej dyspersji hydrodynamicznej (współczynnik dyspersji hydrodynamicznej był równy współczynnikowi dyspersji mechanicznej, transport dyfuzyjny nie odgrywał istotnej roli, Kutilek i Nielsen 1994). Uzyskane w wyniku optymalizacji wartości współczynnika zatrzymania R były w większości przypadków mniejsze od jedności, co mogło być wynikiem braku przepływu roztworu we wszystkich klasach porów. Najwyższe wartości R otrzymano dla rozwiązania A-1, nieco niższe dla rozwiązań A-0 i A-2. Różnice w wartościach współczynnika zatrzymania nie przekraczały

4%. Na podstawie rozwiązania A-2 uzyskano najwyższe wartości współczynnika dyspersji hydrodynamicznej, a najniższe na podstawie rozwiązania A-0, przy czym różnice nie przekraczały 7%. Określona w wyniku optymalizacji dyspersyjność (λ), będąca ilorazem współczynnika dyspersji i prędkości wody w porach, mieściła się w przedziale 0,4–1,8 cm, co mieści się w przedziale wartości tego współczynnika spotykanych w literaturze dla kolumn glebowych o naruszonej strukturze (van Genuchten i Wierenga 1986; Smettem 1991).

Pomierzone i wyrównane krzywe przejścia na podstawie rozwiązania A-2 dla eksperymentu typu front w kolumnach wypełnionych piaskiem przedsta-

wiono na rysunku 3a, a w kolumnach wypełnionych pyłem na rysunku 3b.

Eksperymenty typu puls. Metoda optymalizacji została wykorzystana również do określenia parametrów dyspersji na podstawie zarejestrowanych krzywych przejścia w eksperymencie typu puls. Optymalizację przeprowadzono zgodnie z równaniem (21). Wykonano dwie grupy obliczeń: optymalizację dwuparametrową w której wielkościami poszukiwanymi były liczba Pecleta (P) i współczynnik zatrzymania (R), a znaną (pomierzoną) – czas względny trwania pulsu (T_0) oraz optymalizację trzyparametrową, w której poszukiwano wartości optymalnych dla P , R i T_0 . Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2. Przyjmując jako kryterium wartości sumy odchyłeń kwadratów można stwierdzić, że optymalizacja trzyparametrowa daje zdecydowanie lepsze wyrównanie wyników pomiarów krzywych przejścia. Wartości czasu trwania pulsu T_0 określone w wyniku optymalizacji były wyższe od pomierzonych w przypadku eksperymentów prowadzonych na kolumnach wypełnionych piaskiem w przeciwieństwie do eksperymentów prowadzonych na kolumnach wypełnionych pyłem. Poszukiwane wartości liczby Pecleta są prawie we wszystkich przypadkach większe od 20, co świadczy o niewielkiej roli transportu dyfuzyjnego substancji w przebiegu zjawiska. We wszystkich przypadkach określona wartość współczynnika zatrzymania była mniejsza od jedności, co prawdopodobnie było spowodowane faktem, że nie wszystkie pory glebowe uczestniczyły w transporcie roztworu KCl. Największe wartości R uzyskano

dla rozwiązania A-1, natomiast dla A-0 i A-2 były one nieco niższe. W przypadku optymalizacji trójparametrowej różnice nie przekraczały 6%. Najwyższe wartości współczynnika dyspersji hydrodynamicznej uzyskano w większości przypadków dla rozwiązania A-2, a różnice w stosunku do pozostałych rozwiązań nie były większe od 10%. Wartości dyspersyjności (λ) zmieniały się w granicach od 0,293 do 2,53 cm.

Pomierzone i wyrównane krzywe przejścia na podstawie rozwiązania A-2 dla eksperymentów typu puls w kolumnach piasku luźnego przedstawiono na rysunku 4a, a w kolumnach wypełnionych pyłem na rysunku 4b. Maksymalne wartości stężenia względnego w kolumnach wypełnionych pyłem nie przekroczyły 0,07, a w kolumnach wypełnionych piaskiem luźnym obserwowano dużą rozbieżność pomiędzy optymalizacją trójparametrową i dwuparametrową.

Wnioski

1. W przeprowadzonych eksperymencie typu front najlepszą metodą opracowania wyników pomiarów krzywych przejścia okazała się metoda optymalizacji, w której poszukiwano wartości optymalnych dla liczby podobieństwa Pecleta (P) i współczynnika zatrzymania (R). Różnice pomiędzy wynikami obliczeń współczynnika dyspersji hydrodynamicznej dla trzech różnych rozwiązań analitycznych dla warunków czystej dyspersji hydrodynamicznej nie przekraczały 7%, a współczynnika zatrzymania 4%.

TABELA 2. Parametry dyspersji określone metodą optymalizacji dla różnych rozwiązań analitycznych na podstawie pomierzonych krzywych przejścia w eksperymentach typu puls

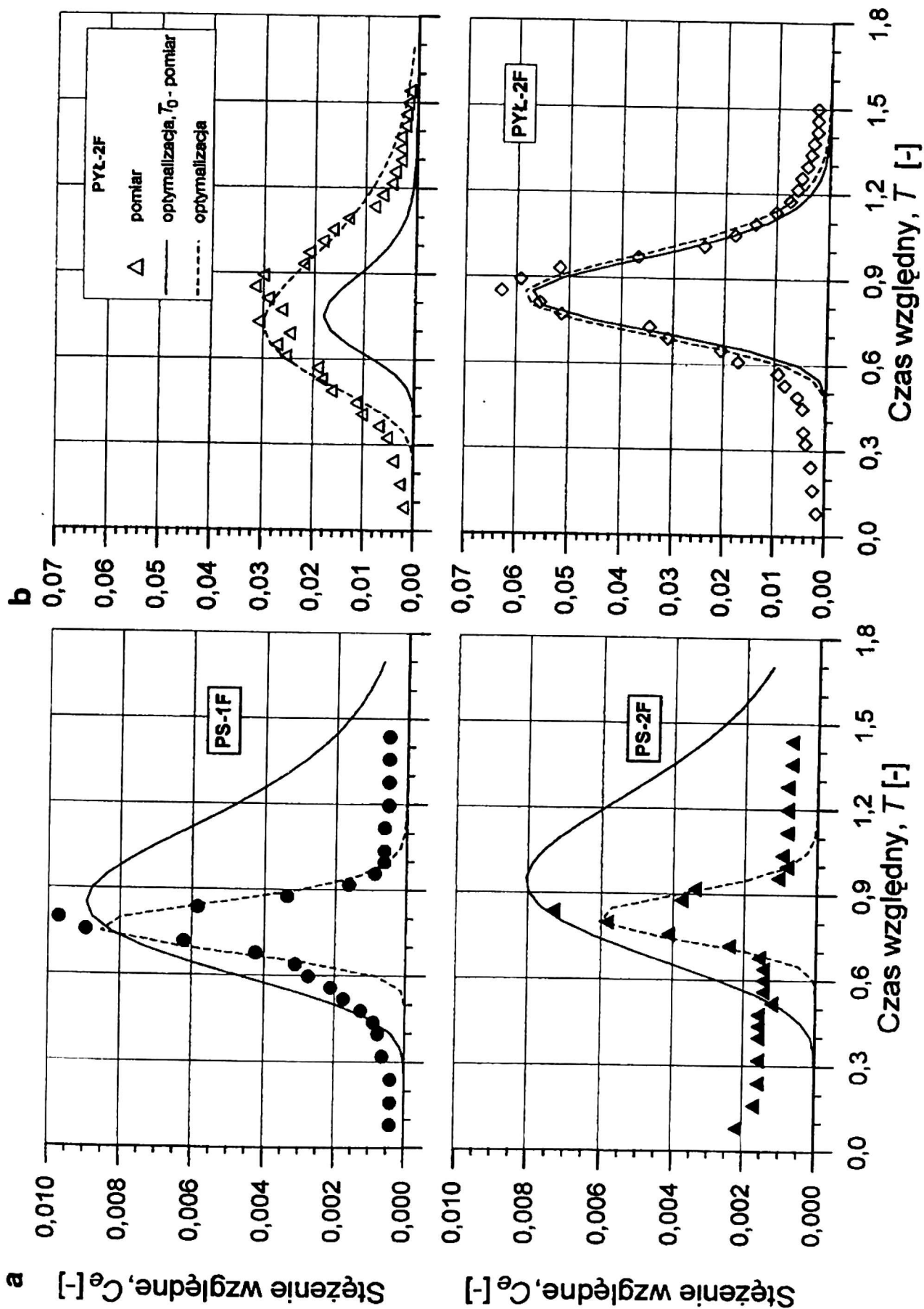
Para- metry	Optymalizacja, $T_0 =$ pomiar			Optymalizacja		
	rozwiązania			rozwiązania		
	A-0	A-1	A-2	A-0	A-1	A-2
Eksperyment PL-1P						
P	20,0	20,0	20,0	153,9	158,5	157,5
R	0,934	0,978	0,929	0,772	0,777	0,773
T_0	0,00614	0,00614	0,00614	0,00189	0,00186	0,00187
D	11 263,9	11 263,9	11 263,9	1 463,8	1 421,3	1 430,3
λ	2,255	2,255	2,255	0,293	0,285	0,286
SSQ	0,3191	0,3251	0,3310	0,0220	0,0221	0,0220
Eksperyment PL-2P						
P	20,0	20,0	20,0	195,5	192,5	194,5
R	0,960	1,020	1,030	0,824	0,828	0,824
T_0	0,00614	0,00614	0,00614	0,00128	0,00129	0,00128
D	11 263,9	11 263,9	11 263,9	1 152,3	1 170,3	1 158,2
λ	2,255	2,255	2,255	0,231	0,234	0,232
SSQ	0,3529	0,3521	0,3255	0,03462	0,03463	0,03461
Eksperyment PYŁ-1P						
P	61,2	60,4	60,3	19,9	18,3	17,8
R	0,773	0,786	0,773	0,788	0,834	0,789
T_0	0,00623	0,00623	0,00623	0,01760	0,01830	0,01830
D	392,2	397,4	398,0	1 206,1	1 311,6	1 348,4
λ	0,737	0,747	0,748	2,266	2,464	2,534
SSQ	3,6546	3,6551	3,6546	0,2643	0,2590	0,2533
Eksperyment PYŁ-2P						
P	82,4	81,6	81,5	68,5	69,6	68,2
R	0,846	0,856	0,846	0,847	0,859	0,847
T_0	0,01868	0,01868	0,01868	0,02090	0,02080	0,02090
D	349,1	352,5	353,0	420,0	413,3	421,8
λ	0,547	0,553	0,553	0,658	0,648	0,661
SSQ	0,6117	0,6126	0,6116	0,4626	0,4637	0,4623

P [-]; R [-]; T_0 [-]; D [cm d^{-2}]; λ [cm]; SSQ – suma odchyłeń kwadratów $\cdot 10^{-3}$ [-]

2. W eksperymentach typu puls najlepsze wyniki otrzymano na podstawie optymalizacji trójparametrowej obejmującej liczbę Pecleta (P), współczynnik zatrzymania (R) i czas względny trwania pulsu (T_0). Różnice pomiędzy wartościami obliczonych współczynników dyspersji dla trzech różnych rozwiązań analitycznych i reżimu czystej dyspersji

hydrodynamicznej nie przekraczały 10%, a w przypadku współczynnika zatrzymania 6%.

3. W eksperymentach typu puls szczególną uwagę należy zwrócić na precyzyjny pomiar przebiegu stężenia w czasie, ze względu na małe stężenie względne odciekającego roztworu od precyzji tych pomiarów zależy bowiem



RYSUNEK 4. Pomierzone i wyrównane krzywe przejścia dla eksperymentu typu puls na kolumnach: a – piasek luźny, b – pył

dokładność określenia parametrów krzywej przejścia.

4. Wartość współczynnika zatrzymania określona w większości przeprowadzonych eksperymentów była mniejsza od jedności, co mogło być spowodowane albo wypłukiwaniem soli z gleby, albo tym, że w ruchu roztworów nie brały udziału wszystkie klasy porów.

Literatura

- JURY W.A., GARDNER W.R., GARDNER W.H. 1991: *Soil physics*. John Wiley and Sons, 218–242.
- KUTILEK M., NIELSEN D.R. 1994: *Soil hydrology*. Catena Verlag, 274–324.
- SMETTEM K.R.J. 1991: *Solute movement in soils*. W: Solute processes (ed. S.T. Trudgill), Academic Press, 141–165.
- van GENUCHTEN M.Th., ALVES W.J. 1982: *Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation*. USDA-ARS Tech. Bull. 1661. Government Printing Office, Washington DC, 151 s.
- van GENUCHTEN M.Th., WIERENGA P.J. 1986: *Solute dispersion coefficients and retardation factors*. W: Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods (ed. A. Klute). Agronomy Monograph no 9 (2nd edition), 1025–1054.

Summary

Determination of solute transport parameters from laboratory displacement experiments. The paper presents results of comparison of solute dispersion coefficients and retardation factors calculated from experimental data. Solute transport experiments using a non-reactive tracer (KCl) were conducted on disturbed, saturated columns formed from sand and sandy loam soils. Breakthrough curves were measured for frontal and pulse type displacement experiments. Three commonly used analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation were fitted to the measured breakthrough curves in order to determine the transport parameters. The least-squares optimization method was used for determination of the solute dispersion coefficients and retardation factors. In case of frontal type displacement experiments the parameters were also obtained from the method based on a log-normal plot of the effluent curve. Results based on least-squares optimization method were the most accurate. The fitted values of transport parameters were associated with particular form of considered analytical solution. Methods based on different analytical solutions but applied to the same experimental data leads to different values for transport parameters.

Authors' address

J. Szatyłowicz, D. Szejba, T. Brandyk, E. Waniek
Warsaw Agricultural University – SGGW
02–787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166
Poland