

TÍNH TOÁN NỒNG ĐỘ CỦA CHẤT ĐÁNH DẤU MUỐI TỪ TÍN HIỆU ĐIỆN THỂ TỰ NHIÊN

Huỳnh Thị Thu Hương⁽¹⁾, Lại Viết Hải⁽¹⁾, Lê Văn Sơn⁽¹⁾,
Trần Trọng Hiệu⁽¹⁾, Nguyễn Hữu Quang⁽¹⁾

(1) Trung tâm Ứng dụng kỹ thuật hạt nhân trong công nghiệp

Ngày nhận bài 10/10/2021; Ngày gửi phản biện 15/10/2021; Chấp nhận đăng 30/11/2021

Liên hệ email: huonghtt@canti.vn

<https://doi.org/10.37550/tdmu.VJS/2021.06.251>

Tóm tắt

Ứng dụng phương pháp đo điện thế tự nhiên trong phát hiện sự di chuyển của chất đánh dấu muối qua dòng thấm ưu tiên trong đập được xem là giải pháp khả thi cho phép xác định hướng cũng như phân bố vận tốc dọc theo dòng thấm. Nhằm chứng minh mối liên hệ giữa tín hiệu điện thế và nồng độ muối, báo cáo đề xuất phương pháp chuyển đổi tín hiệu điện thế tự nhiên đo được trên bề mặt đất thành phân bố nồng độ của chất đánh dấu muối tại vị trí tương ứng dựa trên nghiệm giải tích của phương trình mật độ dòng điện tổng. Phương pháp sau đó được kiểm chứng trên số liệu thí nghiệm của Mainault và Bernabé (2005). Kết quả tính cho thấy nồng độ của chất đánh dấu muối chuyển đổi từ tín hiệu điện thế tự nhiên thực nghiệm phù hợp với giá trị tính từ phương trình vận chuyển khuếch tán. Bên cạnh đó, nghiên cứu cho thấy thời điểm biến thiên cực đại của tín hiệu điện thế thể hiện sự tương đồng với thời điểm xuất hiện chất đánh dấu tại điểm đo.

Từ khóa: chất đánh dấu muối, đập đất, rò rỉ, điện thế tự nhiên, đường cong đáp ứng

Abstract

CALCULATION OF SALT TRACER CONCENTRATIONS FROM SELF - POTENTIAL DATA

Applying the self-potential method to detect the transport of salt tracer through the dam's preferential flow paths may be a possible solution that allows determining the direction and velocity distribution of seepage flow. To demonstrate the relationship between the potential signals and the salt concentrations, the report proposes a method to invert the measured self-potential signals into salt tracer concentration curves based on the solution of the total current density equation. The method was then verified on experimental data published by Mainault and Bernabé (2005). The calculation results show that the concentration values of the salt tracer converted from the experimental self-potential signals agree with the calculated values from the advection-dispersion equation. In addition, the study shows that the time of maximum variation of the potential signal is consistent with the time of tracer appearance at the measurement point.

1. Đặt vấn đề

Phương pháp điện thế tự nhiên là kỹ thuật địa vật lý thụ động dựa trên việc đo trường điện thế trên bề mặt hoặc trong lỗ khoan, hình thành bởi mật độ dòng điện nguồn bên dưới mặt đất bằng các điện cực không phân cực. Kể từ khi các phép đo đầu tiên được thực hiện bởi Fox (1830) trong khảo sát khoáng hóa sulphide (Fox, 1830), phương pháp đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như điều tra khoáng sản (Babu và cs., 1988; Biswas và cs., 2016), địa nhiệt (Corwin và cs., 1979; Revil và cs., 1999b) và địa chất thủy văn (Bogoslovsky và cs., 1973; Sandberg và cs., 2003). Bên cạnh đó, do nhu cầu khai thác hồ chứa thủy lợi và thủy điện phục vụ sản xuất và đời sống gia tăng, ứng dụng phương pháp điện thế tự nhiên trong khảo sát thăm dò qua đập cũng được báo cáo trong nhiều thập kỷ qua (Bogoslovsky và cs., 1970; Al-Saigh và cs., 1994; Moore và cs., 2011).

Năm 2011, Bolève cộng sự đề xuất phương pháp sử dụng chất đánh dấu muối để làm rõ tín hiệu điện thế điện động của dòng thấm, từ đó xác định đồng thời vị trí, độ thấm, hướng và vận tốc thấm cũng như sự phát triển hình học của dòng thấm ưu tiên trong đập theo thời gian thực (Bolève và cs., 2011). Trong đó, khi bỏ qua sự đóng góp nhiệt và các vật dẫn electron, hai thành phần chính đóng góp vào điện thế tự nhiên gồm thế điện động – liên quan đến mật độ điện tích dư khi nước lưu chuyển trong kẽ rỗng, và thế điện hóa – đặc trưng bởi sự chênh lệch thế hóa học của các ion hòa tan trong môi trường thấm (Jouniaux và cs., 2009). Khả năng ứng dụng của phương pháp đã được chứng minh trong các nghiên cứu cứu của Ikard và cộng sự (2012) ở quy mô phòng thí nghiệm và thực địa hiện trường (Ikard và cs., 2005). Tuy nhiên, mối liên hệ tường minh giữa tín hiệu điện thế và nồng độ muối theo thời gian di chuyển của chất đánh dấu muối dường như ít được chú ý. Mainault và Bernabe (2005) khảo sát khả năng theo dõi sự di chuyển của dung dịch muối bằng phương pháp điện thế tự nhiên trên mô hình vật lý (Mainault và cs., 2016). Trong khi đó, Giampaolo và cs. (2016) đề xuất phương pháp chuyển đổi tín hiệu điện thế tự nhiên thành nồng độ chất đánh dấu muối dựa trên phương trình Planck-Henderson, tuy nhiên bỏ qua sự đóng góp của thế điện động.

Nhằm chứng minh mối liên hệ giữa tín hiệu điện thế và nồng độ muối, báo cáo đề xuất phương pháp chuyển đổi tín hiệu điện thế tự nhiên đo được trên bề mặt thành phân bố nồng độ của chất đánh dấu muối NaCl tại vị trí tương ứng. Phương pháp tính được xây dựng dựa trên phương trình mật độ dòng điện tổng đề xuất bởi Revil và cộng sự (2006). Phương pháp sau đó được kiểm chứng trên số liệu thí nghiệm của Mainault và Bernabé (2005).

2. Đối tượng và phương pháp

2.1. Cơ sở lý thuyết của phương pháp tính

Vector mật độ dòng điện tổng $\vec{j}$ tạo ra trường điện thế trên bề mặt được mô tả bởi định luật Ohm tổng quát (Sill, 1983): $\vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_s$ (1) với σ là độ dẫn điện của môi

trường rỗng xốp ($S.m^{-1}$), $\vec{j}_s$ là vector mật độ dòng điện nguồn ($A.m^{-2}$), $\vec{E} = -\nabla\psi$ là vector điện trường ($V.m^{-1}$) với σ là điện thế (V). Áp dụng phương trình liên tục của điện tích trong giới hạn tần số thấp của phương trình Maxwell (Sill, 1983): $\nabla \cdot \vec{j} = 0$ (2)

Khi chất đánh dấu muối di chuyển qua môi trường rỗng xốp, bỏ qua sự đóng góp nhiệt và các vật dẫn electron như thân quặng, mật độ dòng điện nguồn tạo ra tín hiệu điện thế tự nhiên được đóng góp bởi hai thành phần: mật độ dòng tải tạo bởi sự lưu chuyển của các điện tích dư theo pha nước trong môi trường rỗng xốp và mật độ dòng khuếch tán liên quan đến sự di chuyển của ion hòa tan từ nơi có nồng độ cao sang nơi có nồng độ thấp (Jouniaux và cs., 2009). Khi chất đánh dấu muối đặc trưng bởi ion Na^+ và Cl^- , mật độ dòng điện nguồn được xác định bởi phương trình (Revil và cs., 2006; Revil, 1999)

$$\vec{j}_s = \bar{Q}_v \vec{v} - \frac{K_b T}{Fe} (2t_{(+)} - 1) \nabla \sigma_f \quad (3)$$

Trong đó, $\vec{v} = -\frac{\bar{k}}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla z)$ là vector vận tốc Darcy (m/s) với $\bar{k}$ là ten-xơ độ thấm của môi trường (m^2), μ là độ nhớt động lực của nước (Pa.s), p là áp suất kẽ rỗng (Pa), ρ là khối lượng riêng của nước (kg/m^3), g là gia tốc trọng trường (m/s^2), z là độ chênh mực nước giữa các biên vào và ra (m) (Oltean và cs., 2002); $\bar{Q}_v$ là mật độ điện tích dư ($C.m^{-3}$ mẫu cát nhồi) (Martínez-Pagán và cs., 2010); $e = 1,6022 \times 10^{-19}$ là điện tích electron (C); $t_{(+)} = 0,38$ là số Hittorf vi mô của ion Na^+ (Revil, 1999); $\sigma_f = \sigma F$ là độ dẫn điện của nước kẽ rỗng (S/m) (Martínez-Pagán và cs., 2010). Ở điều kiện nhiệt độ xác định, độ dẫn điện của nước σ_f tỷ lệ với nồng độ muối NaCl (C , mol/L) theo Phương trình (Maineult và cs., 2016):

$$\sigma_f = \Lambda^o C + \sigma_{f0} \quad (4)$$

Với Λ^o là độ dẫn điện đương lượng của NaCl trong nước ($\Lambda^o = 12,64 S.dm^3.m^{-1}.mol^{-1}$ ở $25^\circ C$ (Lide, 2004), σ_{f0} là độ dẫn điện ban đầu của nước (S/m).

Bỏ qua hiệu ứng hấp phụ, nồng độ chất đánh dấu muối được xác định bởi phương trình vận chuyển khuếch tán (Ingebritsen và cs., 1998):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\bar{D} \nabla C - \vec{v}^* C) \quad (5)$$

Với $\bar{D}$ là ten-xơ phân tán thủy động lực học (m^2/s) và $\vec{v}^* = \vec{v}/\phi$ là vận tốc nước qua kẽ rỗng (m/s). Xét môi trường đẳng hướng, hệ số phân tán thủy động lực học $D = \frac{D_0}{F\phi} + \alpha v^*$, trong đó D_0 là hệ số khuếch tán của NaCl trong dung dịch

$D_0 = 1,6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ở 25°C (Ikard và cs., 2005), α là tham số phân tán của môi trường (m).

Kết hợp Phương trình (1), (2) và (3) ta có:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\sigma_f}{F} \nabla \psi \right) = \nabla \cdot \left[\bar{Q}_v \bar{v} - \frac{K_b T}{Fe} (2t_{(+)} - 1) \nabla \sigma_f \right] \quad (6)$$

Trong điều kiện dòng chảy ổn định trong môi trường đồng nhất, Phương trình (6) được viết dưới dạng một chiều:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_f}{F} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\bar{Q}_v \bar{v} - \frac{K_b T}{Fe} (2t_{(+)} - 1) \frac{\partial \sigma_f}{\partial x} \right] \quad (7)$$

Giải Phương trình (7), độ chênh lệch điện thế giữa $x = x_1$ và $x = 0$:

- Khi $t > 0$: $\Delta \psi|_t = \bar{Q}_v \bar{v} F \int_0^{x_1} \frac{1}{\sigma_f(x, t)} dx - \frac{K_b T}{e} (2t_{(+)} - 1) \text{Ln} \left[\frac{\sigma_f(x_1, t)}{\sigma_f(0, t)} \right] \quad (8)$

- Khi $t = 0$: $\Delta \psi|_0 = \bar{Q}_v \bar{v} F \int_0^{x_1} \frac{1}{\sigma_{f0}} dx \quad (9)$

Cuối cùng, nghiệm giải tích một chiều mô tả độ chênh lệch điện thế do sự di chuyển của dòng chất đánh dấu muối có dạng:

$$EPD = \Delta \psi|_t - \Delta \psi|_0 = \bar{Q}_v \bar{v} F \int_0^{x_1} \left[\frac{1}{\sigma_f(x, t)} - \frac{1}{\sigma_{f0}} \right] dx - \frac{K_b T}{e} (2t_{(+)} - 1) \text{Ln} \left[\frac{\sigma_f(x_1, t)}{\sigma_f(0, t)} \right] \quad (10)$$

Gọi $x_e = [x_1, x_2 \dots x_N]$ là các vị trí đặt điện cực đo, trong khi $x = 0$ là vị trí đặt điện cực tham chiếu và $\sigma(0, t)$ có thể biết trước. Với mỗi bước thời gian $t = [t_1, t_2 \dots t_M]$ đo được độ chênh điện thế giữa điện cực đo và điện cực tham chiếu $[EPD_{10}, EPD_{20} \dots EPD_{N0}]$. Với mỗi phân đoạn $[x_{i-1}, x_i]$, độ chênh điện thế giữa cặp điện cực liền kề tại thời điểm t_j :

$$EPD_{i,i-1} = \bar{Q}_v \bar{v} F \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left[\frac{1}{\sigma_f(x, t_j)} - \frac{1}{\sigma_{f0}} \right] dx - \frac{K_b T}{e} (2t_{(+)} - 1) \text{Ln} \left[\frac{\sigma_f(x_i, t_j)}{\sigma_f(x_{i-1}, t_j)} \right] \quad (11)$$

Áp dụng quy tắc hình thang cho tích phân với hai điểm $\{x_{i-1}, x_i\}$:

$$EPD_{i,i-1} = \frac{\bar{Q}_v \bar{v} F \Delta x}{2} \left[\frac{1}{\sigma_f(x_{i-1}, t_j)} - \frac{2}{\sigma_{f0}} + \frac{1}{\sigma_f(x_i, t_j)} \right] - \frac{K_b T}{e} (2t_{(+)} - 1) \text{Ln} \left[\frac{\sigma_f(x_i, t_j)}{\sigma_f(x_{i-1}, t_j)} \right] \quad (12)$$

Đặt: $A = \frac{\bar{Q}_v \bar{v} F \Delta x}{2} \quad (13); \quad B = \frac{K_b T}{e} (2t_{(+)} - 1) \quad (14)$

$$Y_i = EPD_{i,i-1} - A \left[\frac{1}{\sigma_f(x_{i-1}, t_j)} - \frac{2}{\sigma_{f0}} \right] - B \text{Ln} [\sigma_f(x_{i-1}, t_j)] \quad (15)$$

Phương trình (12) tương đương: $Y_i = A \frac{1}{\sigma_f(x_i, t_j)} - B \ln[\sigma_f(x_i, t_j)]$ (16)

Suy ra:

$$\sigma_f(x_i, t_j) = \frac{A}{B \times W\left(\frac{A}{B} e^{\frac{Y_i}{B}}\right)} \quad (17)$$

Phương trình (17) cho phép chuyển đổi giá trị điện thế tự nhiên đo được trên bề mặt đất thành độ dẫn của nước thấm theo thời gian kể từ khi đánh dấu muối. Nồng độ muối trong nước sau đó có thể được tính toán dựa trên giá trị độ dẫn khi áp dụng Phương trình (4).

2.2. Kiểm chứng phương pháp tính

Nghiên cứu này sử dụng số liệu thí nghiệm của Mainault và Bernabé (2005) để kiểm chứng nghiệm giải tích (10) và phương pháp tính đề xuất.

Mainault và Bernabé (2005) thực hiện thí nghiệm theo dõi sự di chuyển của dung dịch muối bằng phương pháp điện thế tự nhiên trên mô hình vật lý. Mô hình dạng hộp có kích thước 44,25cm × 23,75cm × 26,5cm làm bằng nhựa, được chia thành ba vùng bởi hai vách ngăn. Vùng thấm ở giữa được nhồi cát silic tự nhiên từ Haguenau (Pháp) chứa khoảng 3% khoáng fenspat kali và 1% micas và các khoáng chất đất sét, hai vùng còn lại đóng vai trò như thượng lưu và hạ lưu của vùng thấm. Thí nghiệm sử dụng cấu hình thấm Darcy để tạo dòng chảy đồng nhất qua vùng thấm. Dung dịch muối NaCl có nồng độ đã biết được bơm vào thượng lưu, tín hiệu điện thế tự nhiên sau đó được ghi nhận theo thời gian thông qua các điện cực Cu-CuSO₄ đặt dọc theo dòng thấm, cách điện cực tham chiếu 5cm, 12cm, 19cm và 26cm. Trong thí nghiệm này, vị trí điện cực tham chiếu tại thượng lưu. Bên cạnh đó, nồng độ muối NaCl của nước thượng lưu và hạ lưu được đo thông qua đại lượng độ dẫn. Thông số của thí nghiệm được trình bày trong bảng 1.

Mainault và Bernabé (2005) đưa ra nghiệm giải tích của phương trình vận chuyển khuếch tán mô tả độ dẫn của nước qua vùng thấm từ khi bơm muối:

$$\sigma_f(x, t) = \sigma_{f0} + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{f0}}{2} \times e^{\frac{v^*x - qt}{2D}} \times \left[e^{\mu x} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + \mu\sqrt{Dt}\right) + e^{-\mu x} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \mu\sqrt{Dt}\right) \right] \quad (18)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{v^{*2}}{4D^2} - \frac{q}{V_{up}D}} \quad (19)$$

Bảng 1. Thông số thí nghiệm của Mainault và Bernabé (2005).

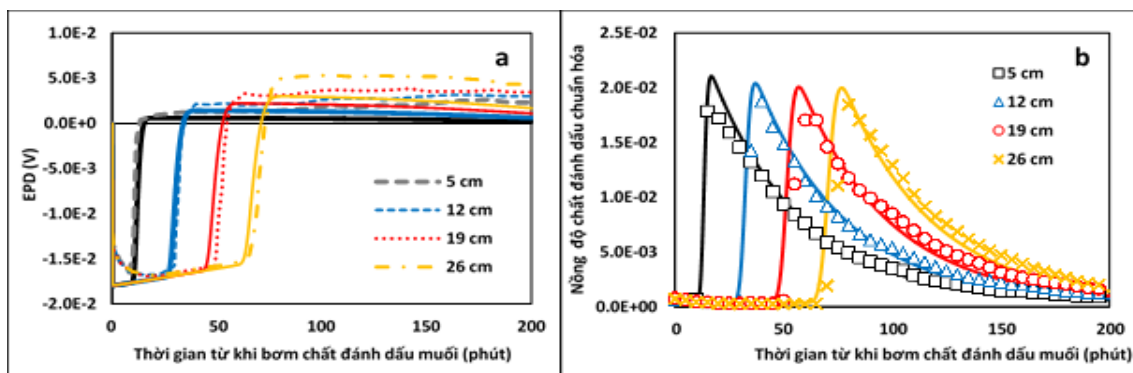
Thông số	Giá trị
Thượng lưu Thể tích V_{up} (m ³)	2,6.10 ⁻³

Độ dẫn cực đại của nước σ_{max} (S/m)	0,177
Chiều cao mực nước h_{up} (m)	0,2
Vùng thấm	
Đường kính cát nhồi d_p (μ m)	292 ± 55
Độ rỗng Φ	0,365
Lưu lượng thấm q (m^3/s)	$1,05 \cdot 10^{-6}$
Vận tốc Darcy v (m/s)	$2,21 \cdot 10^{-5}$
Độ thấm k (m^2)	$2,96 \cdot 10^{-11}$
Độ dẫn ban đầu của nước σ_{p0} (S/m)	0,00283
Hệ số khuếch tán thủy động lực học D_L (m^2/s)	$1,50 \cdot 10^{-8}$
Hệ số hình thành F	4,1
Nhiệt độ T (K)	298,15
Hạ lưu	
Thể tích V_{down} (m^3)	$2,68 \cdot 10^{-3}$
Chiều cao mực nước h_{down} (m)	0,2

3. Kết quả nghiên cứu

Maineult và Bernabé (2005) sử dụng mô hình giải tích đề xuất bởi Sill (1983) đối với thế điện động và phương trình Planck-Henderson đối với thế điện hóa để khớp với tín hiệu điện thế tự nhiên thực nghiệm (Maineult và cs., 2016). Dù được cho là hữu ích trong nhiều trường hợp, tuy nhiên, mô hình này không thể giải thích sự phụ thuộc của điện thế tự nhiên với độ thấm của môi trường đã từng được báo cáo trong nghiên cứu của Jouniaux và Pozzi (1995).

Khác với hướng tiếp cận trên, báo cáo sử dụng phương trình mật độ dòng điện tổng đề xuất bởi Revil và cộng sự (2006) để đưa ra lời giải tường minh mô tả sự phụ thuộc của tín hiệu điện thế vào các thông số như vận tốc thấm, độ thấm cũng như nồng độ chất đánh dấu muối, được thể hiện như Phương trình (10). Kết quả so sánh số liệu thí nghiệm của Maineult và Bernabé (2005) và giá trị tín hiệu điện thế tự nhiên xác định từ Phương trình (10) cho sai số căn quân phương trung bình dưới 2,3 mV được trình bày trong hình 1a, cho phép xác nhận lời giải đã thiết lập.



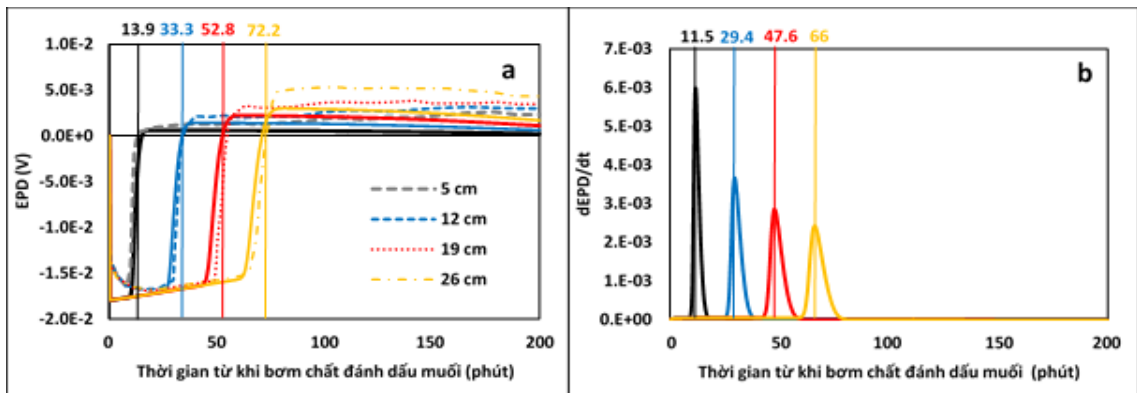
Hình 1. a. Tín hiệu điện thế tự nhiên tại các vị trí cách điện cực tham chiếu 5cm, 12cm, 19cm, 26cm: mô hình giải tích (nét liền) và số liệu thí nghiệm của Maineult và Bernabé (2005) (nét đứt). **b.** Nồng độ muối chuẩn hóa được chuyển đổi từ tín hiệu điện thế tự nhiên thực nghiệm (điểm) so sánh với giá trị tính từ phương trình vận chuyển khuếch tán một chiều (nét liền).

Hình 1b trình bày kết quả áp dụng phương pháp chuyển đổi tín hiệu điện thế tự nhiên đo được trên bề mặt thành phân bố nồng độ của chất đánh dấu muối tại vị trí tương sử dụng số liệu thí nghiệm của Maineult và Bernabé (2005). Kết quả cho thấy nồng độ chuẩn hóa của chất đánh dấu muối chuyển đổi từ tín hiệu điện thế tự nhiên thực nghiệm phù hợp với giá trị tính từ phương trình vận chuyển khuếch tán (Phương trình (18-19)) với sai số căn quân phương trung bình dưới 0,002. Trong đó, nồng độ chuẩn hóa của chất đánh dấu muối tính:

$$C_N(t) = \frac{C(t)}{\int C(t)dt} \quad (20)$$

Kết quả thực nghiệm của Maineult và Bernabé (2005) cho thấy phân bố tín hiệu điện thế tự nhiên theo thời gian từ khi đánh dấu muối tại các vị trí cách điện cực tham chiếu 5cm, 12cm, 19cm, 26cm đều đồng dạng. Cụ thể, tín hiệu từ giá trị âm tăng nhanh qua giá trị 0, sau đó gần như chỉ giảm nhẹ theo thời gian. Maineult và Bernabé (2005) đã chỉ ra thời điểm tín hiệu điện thế đổi dấu sẽ tương ứng với thời gian chất đánh dấu đến các vị trí đo t_a khi bỏ qua hiệu ứng phân tán thủy động lực học, $t_a = \frac{S}{v^*}$ (21) với S là khoảng cách giữa điện cực đo và điện cực tham chiếu, v^* là vận tốc nước qua kẽ rỗng.

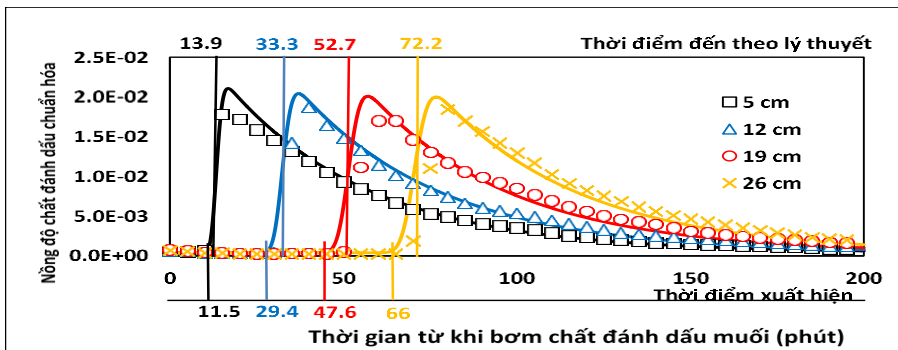
Giá trị t_a tại các vị trí $x = 5\text{cm}$, $x = 12\text{cm}$, $x = 19\text{cm}$, $x = 26\text{cm}$ lần lượt là 13,9 phút, 33,3 phút, 52,8 phút và 72,2 phút như minh họa trong hình 2a. Như vậy, từ thời điểm tín hiệu điện thế thay đổi đột ngột và khoảng cách giữa điện cực đo và điện cực tham chiếu hoàn toàn có thể xác định được vận tốc nước qua kẽ rỗng.



Hình 2. Minh họa thời điểm tín hiệu điện thế đổi dấu và biến thiên cực đại từ khi bơm chất đánh dấu muối.

Hình 2b minh họa thời điểm biến thiên cực đại của tín hiệu điện thế $(dEPD/dt)_{\max}$

tại các vị trí $x = 5\text{cm}$, $x = 12\text{cm}$, $x = 19\text{cm}$ và $x = 26\text{cm}$ lần lượt là 11,5 phút, 29,4 phút, 47,6 phút và 66 phút. Thời điểm này thể hiện sự tương đồng với thời điểm xuất hiện chất đánh dấu tại điểm đo như thể hiện trong Hình 3. Trong đó, thời điểm xuất hiện chất đánh dấu được xác định khi nồng độ của chất đánh dấu bắt đầu vượt giá trị phông. Theo Ferry và Cherry (1979), thời gian xuất hiện của chất đánh dấu tại điểm đo sớm hơn thời gian đến điểm đo theo lý thuyết là kết quả của quá trình phân tán thủy động lực học khi chất đánh dấu di chuyển trong môi trường rối. Trong đó, một số phân tử chất đánh dấu di chuyển nhanh hơn vận tốc nước qua kẽ rỗng và đến điểm đo sớm hơn (Freeze, 1979).



Hình 3. Minh họa thời điểm đến theo lý thuyết và thời điểm xuất hiện của chất đánh dấu tại vị trí đo.

4. Kết luận

Báo cáo trình bày phương pháp chuyển đổi tín hiệu điện thế tự nhiên đo được trên bề mặt thành phân bố nồng độ của chất đánh dấu muối NaCl tại vị trí tương ứng dựa trên phương trình mật độ dòng điện tổng đề xuất bởi Revil và cộng sự (2006). Phương pháp sau đó được kiểm chứng trên số liệu thí nghiệm của A. Maineult và Y. Bernabé (2005). Kết quả cho thấy nồng độ chuẩn hóa của chất đánh dấu muối chuyển đổi từ tín hiệu điện thế tự nhiên thực nghiệm phù hợp với giá trị tính từ phương trình vận chuyển khuếch tán với sai số căn quân phương trung bình dưới 0,002. Bên cạnh đó, nghiên cứu cho thấy thời điểm biến thiên cực đại của tín hiệu điện thế liên quan chặt chẽ với thời điểm xuất hiện chất đánh dấu tại điểm đo.

Các kết quả trên chứng minh tính khả thi của phương pháp đề xuất trong việc phân tích số liệu điện thế tự nhiên đo được trên bề mặt nhằm theo dõi hướng cũng như vận tốc lan truyền của chất đánh dấu muối qua dòng thấm ưu tiên trong đập theo thời gian.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện tại Trung tâm Ứng dụng kỹ thuật hạt nhân trong công nghiệp (Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam, tại thành phố Đà Lạt, tỉnh Lâm Đồng) với kinh phí do Bộ Khoa học công nghệ Việt Nam cấp thông qua đề tài mã số ĐTCB.01/20/TTUDKTHN. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Fox, R. W. (1830). On the electromagnetic properties of metalliferous veins in the mines of Cornwall, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 120, 399-414.
- [2] Babu, R. H. V., Rao. (1988). Inversion of self-potential anomalies in mineral exploration, *Comput. Geosci*, 14, 377-387.
- [3] Biswas, A., Sharma, S. P. (2016). Integrated geophysical studies to elicit the structure associated with uranium mineralization around South Purulia shear zone, India: A review, *Ore Geol. Rev*, 72, 1307-1326.
- [4] Corwin, R. F., Hoover, D. B. (1979). The self-potential method in geothermal exploration, *Geophysics*, 44(2), 226-245.
- [5] Revil, A., Schwaeger, H., et al. (1999b). Streaming potential in porous media: 2. Theory and application to geothermal systems. *Journal of Geophysical Research*, 104(B9), 20033-20048.
- [6] Bogoslovsky, V. A., Ogilvy, A. A. (1973). Deformation of natural electric fields near drainage structures, *Geophys. Prospecting*, 21, 716-723.
- [7] Sandberg, S. K., Slater, L. D., Versteeg, R. (2003). An integrated geophysical investigation of the hydrology of an anisotropic unconfined aquifer. *J. Hydrol*, 267, 227-243.
- [8] Bogoslovsky, V. A., Ogilvy, A. A. (1970). Natural potential anomalies as a quantitative index of the rate of seepage from water reservoirs*. *Geophysical Prospecting*, 18(2), 261-268.
- [9] Al-Saigh, N. H., Mohammed, Z. S., Dahham, M. S. (1994). Detection of water leakage from dams by self-potential method. *Engineering Geology*, 37, 115-121.
- [10] Moore, J. R., Boleve, A., et al. (2011). Self-potential investigation of moraine dam seepage. *Journal of Applied Geophysics*, 74, 277-286.
- [11] Bolève, A., Janod, F., et al. (2011). Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection. *Journal of Hydrology*, 403, 242-252.
- [12] Jouniaux, L., Maineult, A., Naudet, V. (2009). Review of self-potential methods in hydrogeophysics. *C. R. Geoscience*, 341, 928-936.
- [13] Ikard, S. J., Revil, A., et al. (2005). Saline pulse test monitoring with the self-potential method to nonintrusively determine the velocity of the pore water in leaking areas of earth dams and embankments. *Water Resource Research*, 48(W04201).
- [14] Maineult, A., Bernabe, Y. (2016). Detection of advected concentration and pH fronts from self-potential measurements. *Journal of Geophysical Research*, 110(B11205).
- [15] Giampaolo, V., Calabrese, D., Rizzo, E. (2016). Transport Processes in Porous Media by Self-Potential Method. *Applied and Environmental Soil Science*.
- [16] Revil, A., Linde, N. (2006). Chemico-electromechanical coupling in microporous media. *Journal of Colloid and Interface Science*, 302, 682-694.
- [17] Sill, W.R. (1983). Self-potential modeling from primary flows. *Geophysics*, 48, 76-86.
- [18] Revil, A. (1999). Ionic diffusivity, electrical conductivity, membrane and thermoelectric potentials in colloids and granular porous media: A unified model. *J. Colloid Interface Sci*, 212, 503-522.
- [19] Oltean, C., Buès, M. A. (2002). Infiltration of salt solute in homogeneous and saturated porous Media - An analytical solution evaluated by numerical simulations. *Transp. Porous Media*, 48, 61-78.

- [20]Jardani, A., Revil, A., et al. (2007). Tomography of the Darcy velocity from self-potential measurements. *Geophys. Res. Lett*, 34(L24403).
- [21]Martínez-Pagán, P., Jardani, A., et al. (2010). Self-potential monitoring of a salt plume. *Geophysics*, 75(4), WA17 - WA25.
- [22]Lide, D. R. (2004). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press.
- [23]Ingebritsen, S. E., Sanford, W. E. (1998). *Groundwater in Geologic Processes*. The Press Syndicate of The University of Cambridge.
- [24]Jouniaux, L., Pozzi, J. P. (1995). Streaming potential and permeability of saturated sandstones under triaxial stress: Consequences for electrotelluric anomalies prior to earthquakes. *J. Geophys. Res*, 100, 10197-10209.
- [25]Freeze, R. A, Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*, Prentice – Hall.