

Nghiên cứu phát triển và ứng dụng đầu dò điện trở suất, kết hợp với xử lý ảnh kỹ thuật số (DIP) để quan trắc sự phân bố không gian độ ẩm trong mô hình đất

Tô Viết Nam¹ , Nguyễn Gia Thông¹ 

Khoa Kỹ thuật Địa chất và Dầu khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email tác giả liên hệ: tovietnam@hcmut.edu.vn

<https://doi.org/10.67484/GeoGIS.111.1205.2026>

Tóm tắt: Nghiên cứu chế tạo một đầu dò điện trở suất nhằm ước tính độ bão hòa của nước trong đất từ các phép đo điện trở. Đầu dò gồm hai điện cực bằng inox (đường kính 2 mm, chiều dài 100 mm) được lắp đặt cách nhau 12 mm. Quá trình hiệu chuẩn được thực hiện bằng các thử nghiệm sấy khô trong lò, và mối quan hệ giữa điện trở suất và độ bão hòa được minh giải dựa trên định luật Archie, cho ra các hệ số mũ Archie lần lượt là $m = 1.31$ và $n_a = 1.60$, với hệ số tương quan bình phương cao ($R^2 = 0.99$). Mối quan hệ hiệu chuẩn này sau đó đã được áp dụng để theo dõi sự thay đổi của độ bão hòa trong mô hình cột thoát nước thẳng đứng một chiều, đồng thời áp dụng thêm phương pháp phân tích dựa trên hình ảnh tích hợp với quy trình lọc nhiễu (giá trị ngoại lai), kết quả này được sử dụng làm cơ sở đối chứng độc lập. Kết quả thu được từ hai phương pháp cho thấy sự đồng nhất tốt trong phạm vi nghiên cứu, chỉ ra rằng thiết kế đầu dò điện trở suất này cung cấp một công cụ đáng tin cậy với chi phí tương đối thấp, được dùng để quan trắc sự phân bố không gian độ ẩm trong các mô hình đất trong phòng thí nghiệm và có thể mở rộng cho các loại đất khác nếu được hiệu chuẩn phù hợp.

Từ khóa: Độ bão hòa của đất, đầu dò điện trở suất, điện trở suất, phương pháp xử lý ảnh, thí nghiệm thoát nước thẳng đứng một chiều (1-D).

Ngày nhận bài: 26/06/2026 Ngày sửa lại: 27/07/2026 Ngày chấp nhận đăng: 11/08/2026 Ngày xuất bản: 30/10/2026

Developing and applying electrical resistivity probes and digital image processing (DIP) to monitor spatial moisture distribution in soil models

To Viet Nam¹ , Nguyen Gia Thong¹ 

¹ Faculty of Geology and Petroleum Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM), Ho Chi Minh City, Vietnam

Corresponding Author Email: tovietnam@hcmut.edu.vn

Abstract: Research on the fabrication of a resistivity probe to estimate soil water saturation from electrical resistance measurements. The probe consists of two stainless steel electrodes (2 mm in diameter and 100 mm in length) installed with a spacing of 12 mm. The calibration process was conducted using oven-drying tests, and the relationship between electrical resistivity and water saturation was interpreted based on Archie's law, yielding Archie's exponents of $m = 1.31$ and $n_a = 1.60$, respectively, with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.99$). This calibration relationship was subsequently applied to monitor saturation changes in a one-dimensional (1-D) vertical drainage column model. Concurrently, an image-analysis-based method integrated with an outlier filtering procedure was employed to serve as an independent reference. The results obtained from both methods demonstrated good agreement within the scope of the study, indicating that this resistivity probe design provides a reliable, relatively low-cost tool to monitor spatial moisture distribution in soil models, with the potential for expansion to other soil types given appropriate calibration.

Keywords: Soil water saturation, resistivity probe, electrical resistivity, image processing method, one-dimensional (1-D) vertical drainage experiment.

Submission received: 26/06/2026

Revised: 27/07/2026

Accepted: 11/08/2026

Published: 30/10/2026

1. Mở đầu

Xác định độ bão hòa là một nhiệm vụ quan trọng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, đặc biệt là trong các ngành khoa học Trái Đất, với các ứng dụng trong các nghiên cứu về: sự di chuyển của nước, nhiệt và chất hòa tan trong đất [1], xác định độ mặn của đất [2–4], xác định mức độ ô nhiễm nước [5–8], đánh giá tiềm năng dầu khí trong đá chứa [9].

Nhiều phương pháp đã được đề xuất để xác định độ bão hòa của nước trong đất, trong đó mối tương quan giữa điện trở suất và độ bão hòa của đất là một trong những hướng được nghiên cứu rộng rãi nhất [2,10–12]. Một số thiết bị đo điện trở suất của đất đã được phát triển và được ứng dụng rộng rãi, chẳng hạn như cảm biến dạng kim được thiết kế để đặc trưng hóa các tính chất địa nhiệt, hàm lượng nước và độ dẫn điện [1,13], cảm biến điện trở suất thu nhỏ để đo dòng chảy đa pha trong các thí nghiệm phòng thí nghiệm [14], đánh giá sự biến đổi điện trở suất trong cát [15], sử dụng phương pháp chụp cắt lớp điện trở kháng (ERT) để xác định hàm lượng nước trong đất [16–18], nghiên cứu cấu trúc vi mô của sét thông qua các phép đo điện trở suất [19].

Trong những năm gần đây, một vài nghiên cứu đáng chú ý về việc phát triển các đầu đo để xác định độ bão hòa của đất, bao gồm việc sử dụng đầu đo neutron và cảm biến điện môi [20–23], bên cạnh đó các cảm biến thương mại có độ tin cậy cao đã được áp dụng rộng rãi trong thực tế [24,25] như VWC (Hàm lượng nước theo thể tích), TDT (Thời gian suy giảm nhiệt), FDR (Phản xạ miền tần số), WCR (Phản xạ hàm lượng nước). Ngoài ra, một số thiết bị chuyên dụng đã được phát triển cho các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm về độ bão hòa của đất [26,27]. Tất cả các thiết bị nói trên đều có độ chính xác cao; tuy nhiên, việc triển khai chúng đi kèm với chi phí đầu tư đáng kể.

Để giảm chi phí, một số thiết kế thiết bị cảm biến gần đây đã được đề xuất. Đặc biệt, các cảm biến dạng đầu dò sử dụng cảm ứng điện dung đã được áp dụng để thay thế cho các thiết bị TDR đất liền, từ đó giảm đáng kể chi phí trong khi vẫn cung cấp kết quả chính xác hợp lý [28]. Ngoài ra, các thiết kế dựa trên điện trở suất đã được phát triển để đo các biến đổi của dòng điện một chiều bên trong hộp đất. Những thay đổi thiết kế này sau đó được sử dụng kết hợp với phương trình Archie để xác định độ bão hòa [29]. Mặc dù các thiết bị này cung cấp độ chính xác cao, nhưng vận hành chúng đòi hỏi các quy trình tương đối phức tạp và tốn nhiều thời gian. Do đó, một dạng thiết kế đầu dò đơn giản cấu tạo bao gồm các sợi dây đồng giữa các lớp bông nhúng nước và kết nối chúng với đèn LED, cho phép đo độ ẩm đất tại các vị trí khác nhau [30]; tuy nhiên, độ bão hòa thu được từ thiết bị này có độ chính xác hạn chế.

Mặc dù các cảm biến thương mại mang lại độ chính xác cao và cho phép đo trên quy mô lớn, nhưng trong các nghiên cứu quy mô nhỏ hoặc dưới điều kiện phòng thí nghiệm hạn chế, việc sử dụng các công cụ chi phí thấp hơn trở nên thiết yếu. Do đó, việc phát triển các đầu dò điện trở suất có khả năng xác định độ bão hòa với độ chính xác cải tiến là cần

thiết. Mục tiêu của nghiên cứu này là phát triển một đầu dò điện trở suất đơn giản, hiệu quả về chi phí và chính xác, với mục đích cụ thể là xác định độ bão hòa trong cát sạch.

Một phần quan trọng trong công tác xác định tài nguyên đất nước là giám sát biến đổi độ ẩm và độ bão hòa (S_w) theo không gian. Mặc dù các cảm biến điện trở cung cấp được các số liệu chính xác tại các vị trí cố định, chúng lại bị hạn chế trong việc mô tả phân bố liên tục của độ ẩm trong môi trường đất. Để giải quyết hạn chế này, các kỹ thuật xử lý ảnh kỹ thuật số đóng vai trò như một phương pháp viễn thám cận cảnh. Kỹ thuật này cho phép trích xuất thay đổi độ ẩm liên tục trong không gian đặc biệt là trên các bề mặt.

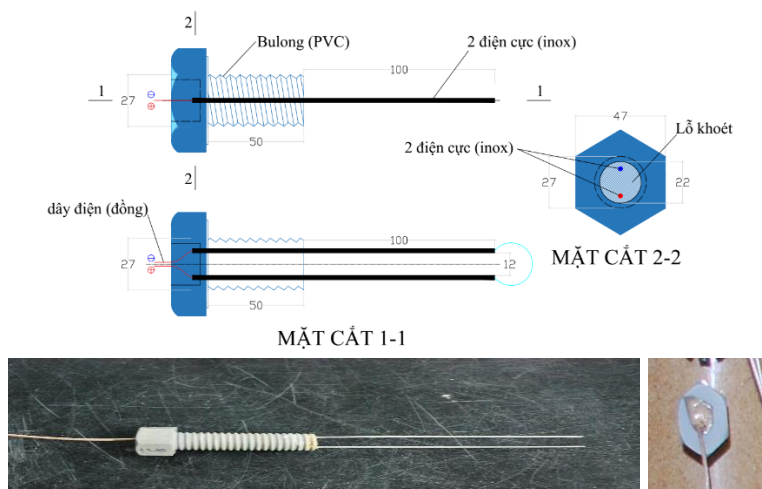
Các kỹ thuật xử lý ảnh cũng đã được nghiên cứu và áp dụng để xác định độ bão hòa của nước trong đất. Sự phát triển của các kỹ thuật xử lý ảnh kỹ thuật số (DIP) phần lớn được thúc đẩy bởi những tiến bộ đáng kể trong lĩnh vực thị giác máy tính [31]. Kỹ thuật này góp phần giải quyết các thách thức trong phân tích cấu trúc đất và phân bố độ ẩm. Một số nghiên cứu nổi bật về ứng dụng thị giác máy tính trong cơ học đất đã sử dụng thuật toán Học máy vector hỗ trợ (SVM) kết hợp với các đặc trưng của Ma trận đồng xuất hiện mức xám (GLCM) để phân loại đất [32,33]. Những nghiên cứu này đã chứng minh khả năng áp dụng các kỹ thuật xử lý ảnh để xác định độ bão hòa nước của đất. Trong nghiên cứu này, phương pháp xử lý ảnh được sử dụng như một phương pháp phụ trợ để kiểm chứng các phép đo của đầu dò điện trở suất.

Sự kết hợp giữa phép đo điện trở sâu bên trong lõi đất và mô hình phân tích ảnh quang học bề mặt tạo ra giải pháp tích hợp đa nguồn dữ liệu, vừa đảm bảo tính liên tục theo chiều sâu vừa phản ánh chi tiết mặt trước thoát nước theo không gian. Nghiên cứu này tập trung phát triển hệ thống quan trắc tích hợp này nhằm nâng cao độ chính xác giám sát trường độ ẩm trong các thử nghiệm mô hình đất một chiều. Các phép đo của đầu dò điện trở suất, khi so sánh với phương pháp xử lý ảnh, đã chứng minh độ chính xác cao của thiết bị này trong việc xác định độ bão hòa của cát sạch, cũng như khả năng áp dụng tiềm năng của nó cho các loại đất khác trong tương lai.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Thiết kế đầu dò điện trở suất

Đầu dò điện trở suất được thiết kế dựa trên nguyên lý dòng điện sẽ gặp cản trở (điện trở) lớn hơn khi đi qua môi trường hạt so với khi đi qua môi trường nước. Do đó, đất có độ bão hòa nước cao hơn sẽ có điện trở suất thấp hơn, trong khi đất có độ bão hòa thấp hơn sẽ có điện trở suất cao hơn. Đầu dò gồm hai điện cực bằng thép không gỉ (inox), mỗi điện cực có đường kính 2 mm, được sắp xếp song song và thẳng hàng với nhau. Vật liệu này có điện trở suất là $7.5 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$. Vật liệu inox được lựa chọn thay vì đồng nhờ có độ bền cơ học cao hơn, giúp ngăn ngừa sự biến dạng của các điện cực khi cắm vào đất. Ngoài ra, inox mang lại khả năng chống ăn mòn cao và mức độ phản ứng hóa học (oxy hóa) thấp trong các điều kiện thí nghiệm, từ đó duy trì độ chính xác của các phép đo.

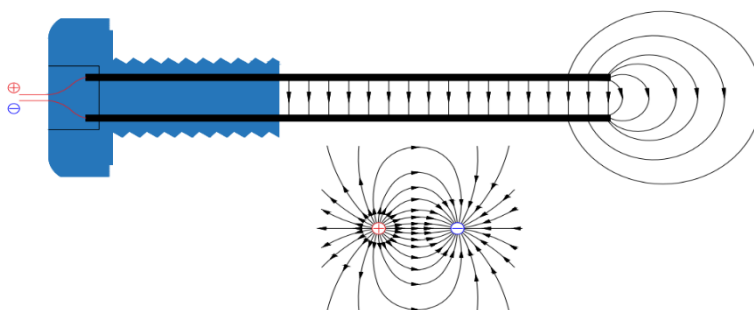


Hình 1. Thiết kế của đầu dò điện trở.

Mỗi điện cực có chiều dài 100 mm, chiều dài này phù hợp cho các điều kiện đo trong phòng thí nghiệm. Nếu các điện cực quá ngắn, điện trường do đầu dò tạo ra không thể bao phủ đầy đủ các hạt đất, dẫn đến các phép đo không hoàn chỉnh. Ngược lại, các điện cực quá dài có thể bị biến dạng trong quá trình cắm vào đất, làm giảm độ chính xác của kết quả. Ngoài ra, các điện cực dài hơn sẽ trở nên cồng kềnh và làm chậm quá trình thí nghiệm.

Hai điện cực được cố định ở phần đế vào một bu-lông nhựa cách điện, bu-lông này được khoan sẵn và gia cố chắc chắn bằng keo epoxy, vừa cách điện vừa chịu nhiệt. Tín hiệu điện được truyền từ nguồn điện đến các điện cực thông qua một dây đồng lõi đôi có tiết diện 0.75 mm². Khoảng cách giữa hai điện cực là 12 mm — đủ rộng để ngăn ngừa hiện tượng đoản mạch, nhưng không quá rộng để làm tăng độ nhạy cảm với các yếu tố nhiễu từ bên ngoài (Hình 1).

Đầu dò có thể hoạt động với cả dòng điện xoay chiều (AC) và dòng điện một chiều (DC), với điện áp đầu vào có thể điều chỉnh theo yêu cầu thí nghiệm. Điện trường phát ra từ đầu dò tuân theo nguyên lý dẫn dòng, trong đó dòng điện chảy từ điện cực dương, đi qua môi trường đất và hướng về điện cực âm (Hình 2). Môi trường đất tạo ra trở kháng đối với dòng chảy điện, dẫn đến sự sụt giảm điện áp đo được. Sự biến đổi điện áp này sau đó được sử dụng để tính toán điện trở suất của đất (Hình 3).



Hình 2: Hướng của các dòng điện phát ra bởi đầu đo điện trở suất.

Sự biến đổi điện áp được đo bằng một vôn kế có sai số đo là 0.001 V. Điện trở của đất sau đó được xác định bằng phương trình sau:

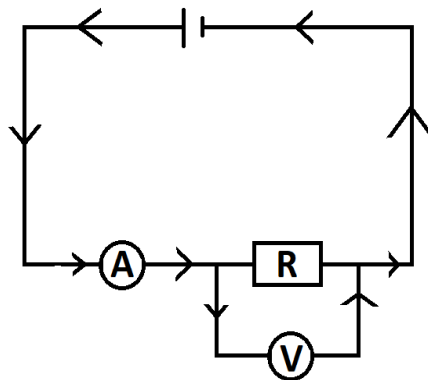
$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

trong đó: R – Điện trở của đất; ΔV – Biến thiên điện thế; I – cường độ dòng điện

Khi có giá trị điện trở đo được, điện trở suất của đất tại vị trí đó có thể được xác định là:

$$\rho_s = \frac{RA}{L} \quad (2)$$

trong đó: ρ_s – Điện trở suất của đất; A – Diện tích tiếp xúc của điện cực; L – Khoảng cách giữa 2 điện cực



Hình 3: Quy trình đo điện trở suất của đất.

2.2. Quy trình hiệu chuẩn.

Cát cỡ hạt trung bình đã được sử dụng cho thí nghiệm này, với các đặc tính như sau: D50 = 0.52, độ rỗng $n = 0.41$.

Trước khi thiết lập mối quan hệ giữa điện trở suất của đất và độ bão hòa nước, điện trở suất của nước được sử dụng trong thí nghiệm và điện trở suất của cát sấy khô trong lò đã được đo đạc. Kết quả chỉ ra rằng điện trở suất của nước dùng cho thí nghiệm này là ~26 $\Omega \cdot m$, thấp hơn nhiều so với điện trở suất của cát khô với độ rỗng $n = 0.41$ là ~15 $k\Omega \cdot m$.

Các mẫu cát khô được chuẩn bị và thử nghiệm trong một hộp thí nghiệm có kích thước $200 \times 150 \times 50$ mm. Nhiệt độ phòng thí nghiệm được duy trì ở 20°C để giảm thiểu sự biến đổi sức căng bề mặt của nước. Độ rỗng của cát trong tất cả các mẫu thử nghiệm hiệu chuẩn được kiểm soát đồng đều và duy trì ở mức 0.41 trong suốt các thí nghiệm. Các mẫu cát được chuẩn bị ở các độ bão hòa khác nhau, đối với mỗi mức độ bão hòa, điện trở suất tương ứng sẽ được đo. Để giảm thiểu sai số trong quá trình thí nghiệm, mỗi mẫu sau

khi đo điện trở suất đều được kiểm tra lại để xác định độ bão hòa của nó. Sự khác biệt giữa độ bão hòa trước và sau khi hiệu chuẩn bắt buộc phải nhỏ hơn 10%. Nếu điều kiện này không được thỏa mãn, thử nghiệm sẽ được lặp lại.

Điện trở suất của đất được đo bằng cách cắm trực tiếp hai điện cực vào đất và cấp dòng điện. Nguồn điện được sử dụng là nguồn dòng một chiều (DC) với điện áp từ 6÷12V.

Với các mẫu cát sạch, không chứa tạp chất và các tính chất của nước trong thí nghiệm được kiểm soát tốt, việc sử dụng phương trình Archie [34] cho cát sạch là phù hợp để xác định độ bão hòa nước trong đất.

$$S_w = \left(\frac{\rho_w \phi^{-m}}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{n_a}} \quad (3)$$

trong đó: S_w là độ bão hòa của nước; m và n_a là hệ số Archie; ϕ là độ rỗng của đất; ρ_s điện trở suất của đất; và ρ_w điện trở suất của nước.

Các giá trị điện trở suất đo được tương ứng với các độ bão hòa khác nhau của mẫu được thu thập và phân tích thống kê. Các giá trị đã xử lý sau đó được khớp hóa (fitting) để thu được đường cong tương quan giữa độ bão hòa và điện trở suất. Kết quả khớp hóa từ các mẫu cho ra các hệ số Archie m và n_a của phương trình Archie (3) đối với cát sạch hạt trung bình. Đối với các loại đất khác, quy trình tương tự phải được thực hiện để xác định các hệ số phù hợp.

2.3. Phương pháp hiệu chuẩn

Để thiết lập mối quan hệ chính xác giữa điện trở suất và độ bão hòa nước của đất, một loạt các thử nghiệm hiệu chuẩn đã được tiến hành. Thay vì hiệu chuẩn phân cứng của đầu dò, mục tiêu là xác định các hệ số thực nghiệm của phương trình Archie (m và n_a) đặc trưng cho loại cát thử nghiệm.

Đối với mỗi mức độ bão hòa, đầu dò điện trở suất đo điện trở suất của các mẫu đã chuẩn bị tương ứng với độ bão hòa cần xác định. Để kiểm chứng độ chính xác của các điểm độ bão hòa được xác định từ trước, một bước kiểm chứng bằng phương pháp sấy khô trong lò đã được tiến hành trên các mẫu song song được chuẩn bị trong cùng điều kiện. Các mẫu này được sấy khô để xác định độc lập hàm lượng ẩm thực tế.

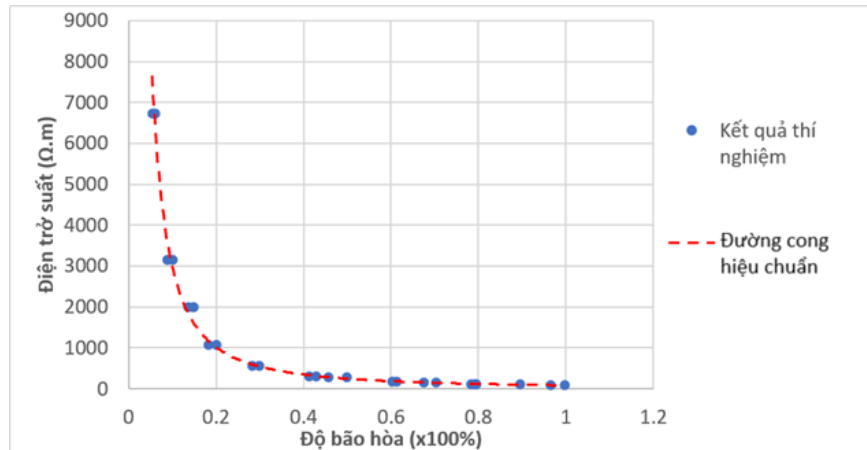
Để đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu, các giá trị độ bão hòa xác định từ các phép đo điện trở suất được kiểm tra chéo với kết quả sấy khô. Mức chênh lệch tối đa cho phép là 10% được thiết lập làm ngưỡng kiểm soát chất lượng; bất kỳ tập dữ liệu nào vượt quá giới hạn này đều bị loại trừ và quy trình hiệu chuẩn được lặp lại. Giao thức kiểm chứng này đảm bảo rằng các tham số khớp cho phương trình Archie được rút ra từ một bộ dữ liệu có tính đồng nhất và được xác thực cao, giảm thiểu các sai số liên quan đến quá trình chuẩn bị mẫu.

Các giá trị độ bão hòa tương ứng với điện trở suất đo được của các mẫu được trình bày trong Bảng 1. Có thể quan sát thấy rằng các mức độ bão hòa của mỗi mẫu trước và sau

thí nghiệm khớp nhau rất chặt chẽ, cho thấy sai số thí nghiệm nằm trong phạm vi chấp nhận được. Phép hồi quy phi tuyến tính đã được áp dụng cho phương trình Archie bằng cách sử dụng dữ liệu thử nghiệm hiệu chuẩn. Đường cong hiệu chuẩn thu được cho ra các giá trị hệ số $m = 1.31$ và $n_a = 1.60$. Kết quả hiệu chuẩn cho thấy mối quan hệ phi tuyến mạnh mẽ giữa điện trở suất và độ bão hòa, với hệ số tương quan bình phương $R^2 = 0.99$, chứng minh khả năng áp dụng phương trình Archie cho cát sạch.

Bảng 1. Các giá trị độ bão hòa tương ứng với điện trở suất đo được.

Điện trở suất ($\Omega.m$)	Độ bão hoà trước thí nghiệm (x100%)	Độ bão hoà sau thí nghiệm (x100%)
85.61	0.9966	0.9653
118.52	0.8956	0.7840
116.80	0.7955	0.7914
149.45	0.7039	0.6755
173.36	0.6021	0.6139
272.91	0.4984	0.4574
300.92	0.4125	0.4291
565.36	0.2995	0.2828
1065.88	0.2000	0.1837
1993.80	0.1499	0.1377
3152.87	0.1002	0.0884
6733.70	0.0618	0.0544



Hình 4: Các giá trị độ bão hòa tương ứng với điện trở suất đo được.

2.4. Ứng dụng

2.4.1. Thí nghiệm thoát nước thẳng đứng một chiều (1-D)

Thí nghiệm thoát nước thẳng đứng một chiều (1-D) được tiến hành để đánh giá hiệu suất của đầu dò điện trở suất trong việc theo dõi các thay đổi độ bão hòa trong đất. Thí nghiệm sử dụng cột thí nghiệm làm bằng vật liệu Plexiglas (Mica) có chiều cao 700 mm và tiết diện 200×200 mm. Cát sạch hạt trung, với các đặc tính chi tiết trong Bảng 1, được

sử dụng làm môi trường đất. Đất ban đầu được duy trì ở trạng thái bão hòa hoàn toàn dưới các điều kiện phòng thí nghiệm được kiểm soát.

Các đầu dò điện trở suất được lắp đặt dọc theo trục thẳng đứng của cột để đo sự biến đổi theo không gian và thời gian của độ bão hòa. Trong quá trình thử nghiệm, sự thoát nước được bắt đầu tại phần đáy dưới điều kiện biên cột nước không đổi, trong khi bề mặt trên cùng được tiếp xúc với áp suất khí quyển. Các giá trị điện trở suất tại mỗi vị trí được ghi lại tại ba khoảng thời gian cụ thể: 1 phút, 10 phút và 1 giờ. Những giá trị đo được này sau đó được chuyển đổi thành độ bão hòa (S_w) bằng cách sử dụng mối quan hệ hiệu chuẩn đã được thiết lập từ phương trình Archie.

2.4.2. Phương pháp xử lý ảnh

Phương pháp xử lý ảnh được sử dụng như một phương pháp phụ trợ để kiểm chứng các phân bố độ bão hòa thu được từ đầu đo điện trở suất. Phương pháp này dựa trên quan sát rằng đất không bão hòa nhìn chung sẽ có màu sáng hơn do hàm lượng nước thấp hơn và sự phản xạ ánh sáng tăng lên. Các hình ảnh được chụp tại nhiều khoảng thời gian khác nhau (1 phút, 10 phút và 1 giờ) để phân tích sự phát triển theo thời gian của độ bão hòa.

Các hình ảnh chụp cột đất được chuyển đổi sang dạng ảnh mức xám (grayscale), và các giá trị độ sáng được trích xuất dọc theo hướng thẳng đứng. Tỷ lệ các điểm ảnh (pixel) sáng tại một độ sâu nhất định được định nghĩa là:

$$P(b) = \frac{b}{T} \times 100 \quad (4)$$

trong đó: $P(b)$ là tỷ lệ phần trăm pixel sáng, b là số lượng pixel sáng tại độ sâu xác định, và T tổng lượng pixel tại độ sâu đó.

Áp dụng các điều kiện biên cho phần trăm pixel sáng và độ bão hòa, phương trình nội suy để ước tính độ bão hòa dựa trên độ sáng thu được là:

$$S(b) = S_{max} - \left(\frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \right) \times (S_{max} - S_{min}) \quad (5)$$

trong đó: P_{min} và P_{max} là phần trăm pixel sáng cực đại và cực tiểu; tương tự, S_{max} và S_{min} là độ bão hòa cực đại và cực tiểu, và P là phần trăm pixel sáng tại độ sâu xác định.

2.4.3. Kỹ thuật Viễn thám cận cảnh và Xây dựng Bản đồ Phân bố Không gian Độ ẩm.

Hình 5 cho thấy các hình ảnh màu nguyên bản độ phân giải cao được chụp qua cột Plexiglas trong suốt tại ba cột mốc quan trọng: $t=1$ phút, 10 phút, và 1 tiếng. Những hình ảnh gốc này đóng vai trò là nguồn dữ liệu sơ cấp, thể hiện trực quan sự chuyển đổi từ trạng thái tối, bão hòa hoàn toàn sang trạng thái sáng hơn, không bão hòa khi không khí đi vào mạng lưới lỗ rỗng. Để duy trì tính nhất quán, các điều kiện chiếu sáng và vị trí camera được giữ không đổi trong suốt thử nghiệm thoát nước.

Các hình ảnh màu thô trước tiên được chuyển đổi sang định dạng mức xám 8-bit để biểu diễn sự phân bố độ ẩm dưới dạng một dải các giá trị cường độ ánh sáng. Sau sự biến đổi này, một giai đoạn lọc giá trị ngoại lai được áp dụng cho dữ liệu mức xám.

Sự cần thiết của việc lọc giá trị ngoại lai phát sinh từ hiện tượng "nhiều" quang học trong dữ liệu thô chụp được, chẳng hạn như các phản xạ ánh sáng mạnh (lóa) từ bề mặt Plexiglas hoặc các bóng tối cục bộ nhỏ. Nếu không lọc, các điểm ảnh dị thường này sẽ bị hiểu sai thành các điểm bão hòa hoặc phi bão hòa cực đoan, dẫn đến những biến động lớn và không chính xác trong các biểu đồ phân bố độ bão hòa cuối cùng. Bằng cách áp dụng quy trình lọc cho các ảnh mức xám, các giá trị ngoại lai này đã được loại bỏ một cách hiệu quả, đảm bảo rằng các giá trị cường độ điểm ảnh dùng để tính toán phản ánh chính xác hàm lượng ẩm thực tế của cấu trúc đất, nhất quán với phương pháp xử lý ảnh cải tiến được đề xuất bởi Nam [35].

Dữ liệu mức xám đã được tinh lọc sau đó được sử dụng để tính toán độ bão hòa thông qua một mối quan hệ ánh xạ tuyến tính, như mô tả trong các Phương trình (4) và (5). Quy trình này cho phép biểu diễn không gian liên tục của mặt trước thoát nước, cung cấp một chuẩn đối chứng phân giải cao để so sánh với các phép đo rời rạc từ các đầu dò điện trở suất.

Để trích xuất phân bố không gian của độ ẩm, mỗi điểm ảnh (pixel) trên ảnh được gán tọa độ không gian [hàng, cột], tương ứng với vị trí thực tế trên cột Plexiglas (700 x 200 mm). Quy trình chuyển đổi giá trị độ sáng pixel sang độ bão hòa $S(b)$ theo Phương trình (5) được thực hiện trên toàn bộ ma trận ảnh, giúp xây dựng biểu đồ phân bố không gian liên tục dọc theo trục đứng. Việc ứng dụng thuật toán lọc giá trị ngoại lai (outlier filtering) đảm bảo triệt tiêu các nhiễu quang học bề mặt, duy trì tính chính xác cho dải dữ liệu không gian.

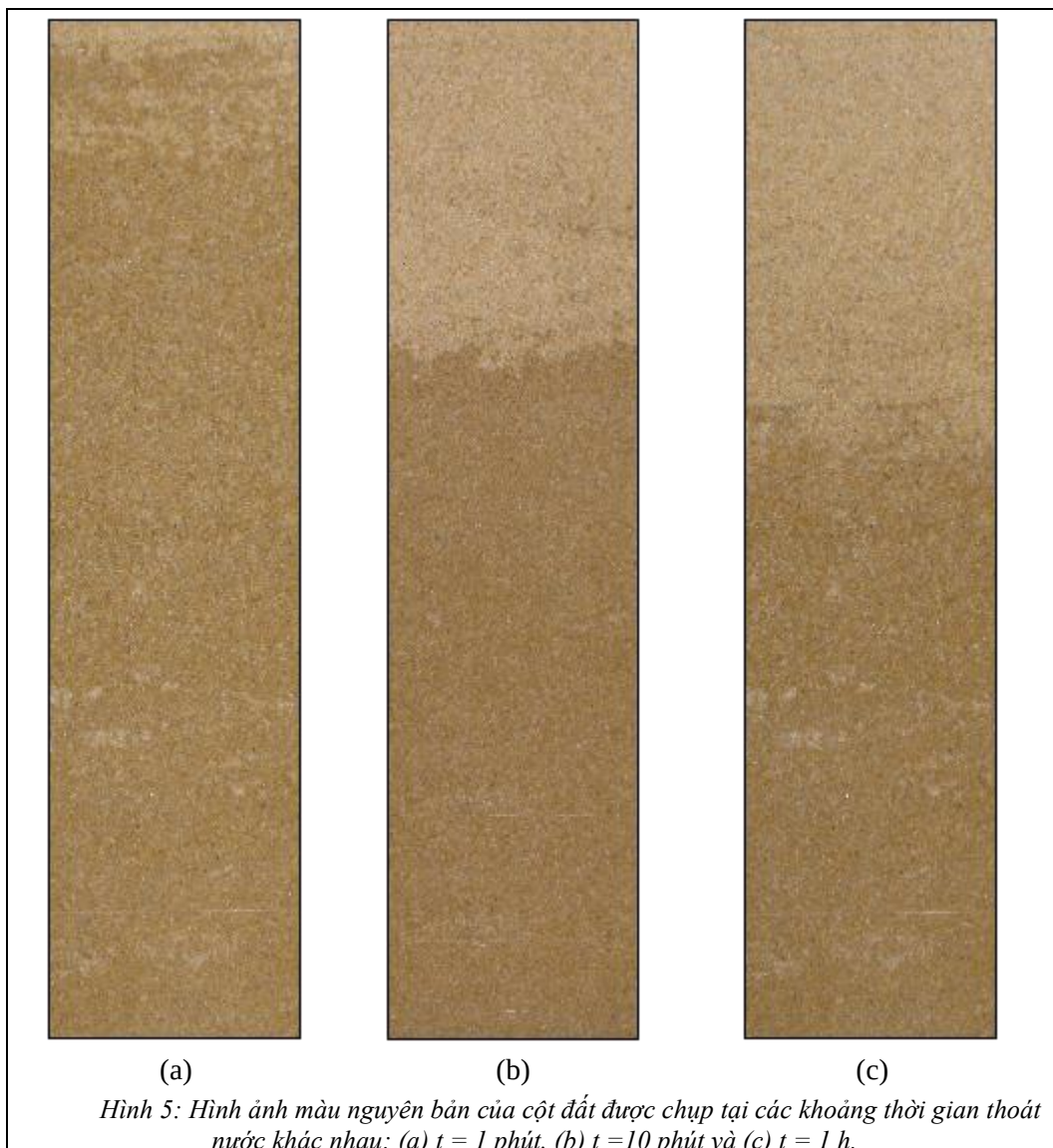
2.4.4. Phân tích dữ liệu ảnh dưới dạng ma trận pixel

Cấu hình của ảnh kỹ thuật số của cột đất ban đầu có dạng phân bố pixel bao gồm 2128 hàng và 567 cột, có thể được viết dưới dạng [567,2128]. Để thuận tiện cho việc thiết lập mô hình tính toán thì phân bố pixel của hình ảnh được phân bố lại thành [567,2400]. Nhóm tác giả nhận thấy tỷ lệ này là phù hợp cho việc phân chia vùng pixel để nội suy độ bão hòa đồng thời không làm kéo giãn ảnh quá mức làm ảnh hưởng đến chất lượng tính toán.

Bước tiếp theo khi có ma trận lớn có dạng [567,2400] như trên thì sẽ tiến hành phân chia thành các ma trận nhỏ hơn với các vùng sáng tương ứng với sự thay đổi của độ bão hòa. Cấu hình của các ma trận nhỏ được chia đều và có dạng [567,30] cho mỗi ma trận. Nhóm tác giả nhận thấy rằng tỷ lệ này là phù hợp vì số lượng điểm cần để đánh giá không cần phải quá nhiều và số lượng điểm được chia tương ứng như trên cũng không quá thừa để tiến hành so sánh với kết quả từ đầu dò điện trở suất.

Các điểm có sắc độ từ 135 trở đi được xem là các pixel sáng, phần trăm số lượng pixel sáng của các ma trận nhỏ trên sẽ được tính toán để ra được giá trị $P(b)$ của phương trình (4).

Như vậy, từ hình ảnh kỹ thuật số ban đầu, các giá trị màu sắc trong không gian được phân tích thành các giá trị pixel qua thị giác máy tính OpenCV2. Hình ảnh được biến thành ma trận với 3 kênh sắc độ phức tạp thành ma trận grayscale với một sắc độ duy nhất. Cuối cùng các giá trị pixel được thống kê phân bố từ đó ra được phân bố độ sáng tương ứng với sự thay đổi độ bão hòa thực tế.



2.4.5. Hiệu chuẩn phương pháp xử lý ảnh so với đầu đo điện trở suất

Để kiểm chứng độ chính xác của các phép đo quang học, một quy trình hiệu chuẩn đã được thực hiện bằng cách đối chiếu độ bão hòa suy ra từ hình ảnh (S_{img}) với các giá trị tham chiếu thu được từ các đầu dò điện trở suất (S_{True}). Mặc dù phương pháp xử lý ảnh cung cấp một dải dữ liệu không gian liên tục, nó có thể nhạy cảm với độ ẩm bề mặt và sự

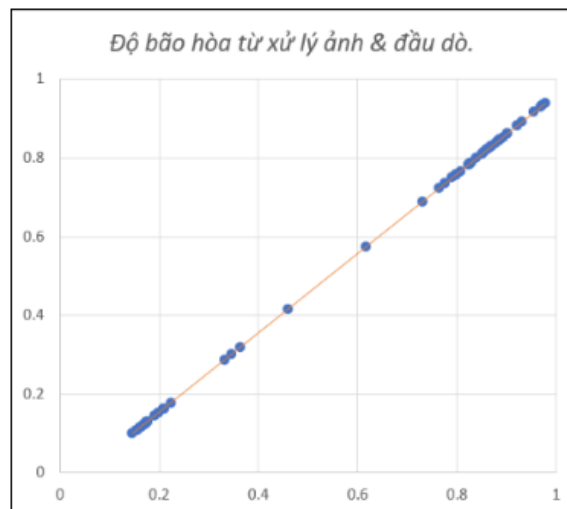
phản xạ ánh sáng. Do đó, việc thiết lập một mối tương quan chặt chẽ là điều thiết yếu để đảm bảo tính toàn vẹn của dữ liệu.

Mô hình hồi quy tuyến tính đã được thiết lập để liên hệ độ bão hòa suy ra từ phương pháp xử lý ảnh (S_{Img}) với độ bão hòa dựa trên đầu dò (S_{True}) như sau:

$$S_{True} = a \times S_{Img} + b \quad (6)$$

trong đó: a và b là các hệ số hồi quy.

Phân tích hồi quy cho ra hệ số góc $a = 1.0104$ và tung độ gốc $b = -0.0494$ (Hình 6), dẫn đến hệ số tương quan $R^2 = 0.99$. Việc hệ số góc gần bằng 1 chỉ ra rằng phương pháp xử lý ảnh đã bắt trọn xu hướng chung của sự biến đổi độ bão hòa với độ tin cậy cao. Tung độ gốc âm nhẹ gợi ý một sai số hệ thống nhỏ, nơi phương pháp này có thể ước tính hơi quá mức độ bão hòa ở các mức độ ẩm rất thấp do hiện tượng lóa quang học.



Hình 6: Hồi quy tuyến tính giữa độ bão hòa rút ra từ phương pháp xử lý ảnh và độ bão hòa dựa trên đầu dò.

Hiệu chuẩn này đã được áp dụng cho tất cả các điểm dữ liệu được ghi lại trong thử nghiệm thoát nước 1-D. Sau khi áp dụng các hệ số hồi quy, các phân bố độ bão hòa đã điều chỉnh cho thấy sự đồng nhất xuất sắc với các phép đo bên trong của đầu dò, đặc biệt là ở vùng chuyển tiếp nơi các gradient độ ẩm thể hiện rõ nét nhất. Như minh họa trong Hình 5, các đường phân bố rút ra từ hình ảnh bám sát các đường phân bố đo được từ đầu dò điện trở suất, điều này xác nhận các hệ số của phương trình Archie ($m = 1.31$, $n_a = 1.60$) là cực kỳ phù hợp cho loại cát này.

Bảng 2. Các tham số hồi quy tuyến tính cho việc kiểm chứng Xử lý ảnh.

Tham số	Giá trị	Ý nghĩa
Hệ số góc (a)	1.0104	Chỉ ra độ nhạy cao khi có thay đổi độ bão hòa
Tung độ gốc (b)	-0.0494	Đại diện cho sai số của phản quang bề mặt
R^2	0.99	Chứng minh mối tương quan cao giữa các phương pháp

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Kết quả nghiên cứu

Sự thay đổi theo không gian - thời gian của độ bão hòa nước trong đất (S_w) được trích xuất thông qua phương pháp xử lý ảnh, được minh họa trong Hình 7. Các đường phân bố cung cấp một hình ảnh trực quan liên tục, độ phân giải cao về quá trình thoát nước bên trong cột cát 700 mm qua ba giai đoạn riêng biệt.

Đường phân bố ban đầu tại thời điểm 1 phút (đường màu xám) bắt trọn ngay lập tức phản ứng của cấu trúc đất sau khi mở van thoát nước. Sự phân bố độ bão hòa cho thấy những biến động đáng kể trong toàn bộ cột, phản ánh quá trình khí đi vào không đồng đều và sự phi bão hòa cục bộ. Những điểm không đều này là kết quả của việc xả lưu lượng cao tại phần đáy, kích hoạt một phản ứng thủy lực không đồng nhất trước khi một mặt trước thoát nước ổn định được thiết lập.

Sau khoảng thời gian 10 phút (đường màu xanh dương), khi quá trình ổn định, một vùng phi bão hòa rõ ràng hơn ở phần trên của cột (trên mức 500 mm), tại vị trí này S_w giảm xuống còn khoảng 0,12–0,15. Đường phân bố cho thấy một sự chuyển tiếp mượt mà hơn, chỉ ra sự hình thành của một mặt ướt nhất quán đang di chuyển xuống dưới.

Tại giai đoạn 1 giờ (đường màu cam), hệ thống tiến gần đến trạng thái cân bằng tạm thời. Vùng không bão hòa đã mở rộng đáng kể, với vùng chuyển tiếp (vùng mao dẫn) được xác định rõ ràng giữa các cao độ 300 mm và 400 mm. Các phần phía trên của cột duy trì ở trạng thái bão hòa dư ổn định, trong khi phần đáy vẫn bão hòa hoàn toàn do ảnh hưởng của việc thoát nước.

Khả năng phân biệt ba pha này của hệ thống xử lý ảnh xác nhận tính hiệu quả của nó như một công cụ theo dõi chính xác để bắt trọn cả những biến động nhanh, tạm thời và các trạng thái cân bằng dài hạn trong đất không bão hòa.

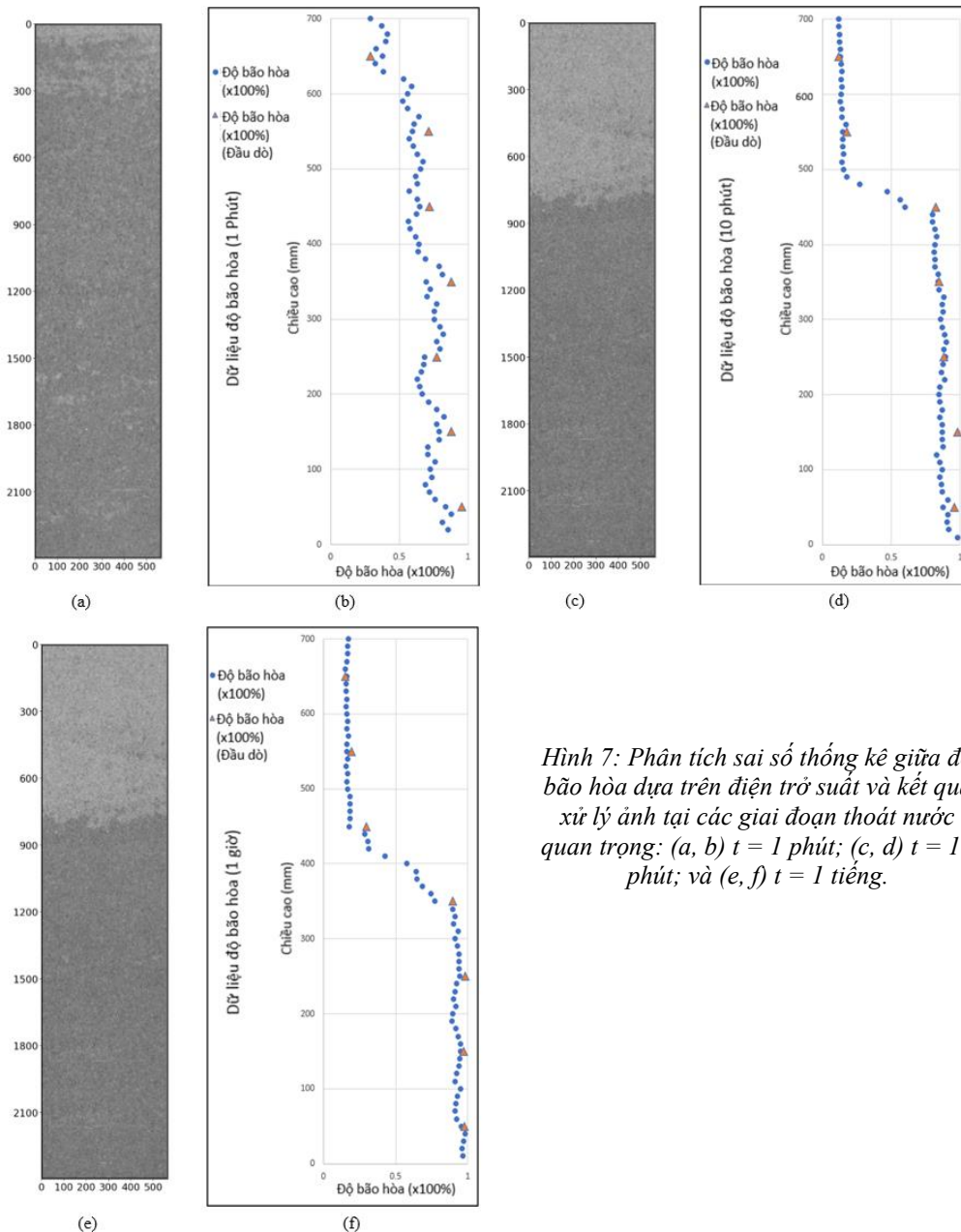
3.2. Thảo luận

Độ tin cậy của đầu dò điện trở suất được đánh giá thông qua việc so sánh trực tiếp với các chuẩn đối chứng từ Xử lý ảnh. Hình 7 tóm tắt Sai số bình phương trung bình căn phương (RMSE) được tính toán tại ba cột mốc, đánh giá hiệu suất của đầu dò trên các chế độ dòng chảy khác nhau.

Ngay tại thời điểm bắt đầu của quá trình thoát nước ($t = 1$ phút), đầu dò cho ra giá trị RMSE là 0,1042 (Hình 7b). Mặc dù sai số này hơi cao hơn so với các sai số quan sát được ở các giai đoạn sau, nó vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được khi xem xét các điều kiện thủy lực tại thời điểm bắt đầu thí nghiệm. Lúc này, dòng chảy có tính động cao, dẫn đến sự phân bố độ bão hòa không ổn định. Do đó, các biến động cục bộ do đầu dò ghi lại phản ánh điều kiện thay đổi thủy động lực ở giai đoạn ban đầu chứ không phải do sự không ổn định của phép đo.

Khi quá trình thoát nước tiến triển đến 10 phút, dòng chảy thủy lực ổn định, và hệ thống duy trì độ chính xác cao hơn với mức RMSE là 0,0783 (Hình 7d). Sự tiến triển này

xác nhận rằng đầu dò điện trở suất không chỉ có khả năng bắt trọn các mặt ướt bão hòa ổn định mà còn đủ nhạy để theo dõi các thay đổi nhanh chóng, tức thời trong các pha phức tạp ban đầu của quá trình phi bão hòa.



Hình 7: Phân tích sai số thống kê giữa độ bão hòa dựa trên điện trở suất và kết quả xử lý ảnh tại các giai đoạn thoát nước quan trọng: (a, b) $t = 1$ phút; (c, d) $t = 10$ phút; và (e, f) $t = 1$ tiếng.

Mặc dù có một sự gia tăng nhẹ về sai số được quan sát thấy sau 1 giờ thoát nước ($RMSE = 0.1116$, Hình 7f), mối tương quan vẫn nằm tốt trong các giới hạn chấp nhận được đối với việc theo dõi trong phòng thí nghiệm địa kỹ thuật. Sự gia tăng biên này về sai số có thể là do những khác biệt cố hữu giữa hai phương pháp: trong khi đầu dò điện trở suất đo phản ứng điện tổng thể bên trong cấu trúc đất, thì phương pháp xử lý ảnh lại nhạy cảm với các biến đổi quang học bề mặt, vốn có thể bị ảnh hưởng bởi sự phản xạ ánh sáng tích lũy

theo thời gian. Nhìn chung, các giá trị RMSE thấp một cách nhất quán qua tất cả các giai đoạn đã chứng minh đầu dò điện trở suất được đề xuất là một công cụ mạnh mẽ và đáng tin cậy để theo dõi động học bão hòa tạm thời.

Kết quả nghiên cứu đã xây dựng và chứng minh tính khả thi khi tích hợp kỹ thuật đo điện trở suất và phân tích ảnh nhằm quan trắc phân bố không gian độ ẩm. Đầu dò điện trở đặc trưng cho các phép đo cố định tại các điểm, còn xử lý ảnh nhấn mạnh dải phân bố độ ẩm. Mức sai số dao động trong khoảng chấp nhận được chứng tỏ tính khả thi của việc sử dụng viễn thám quang học cận cảnh để nội suy trường độ bão hòa.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã chế tạo và kiểm chứng thành công thiết kế đầu dò điện trở suất chi phí thấp, độ chính xác cao để theo dõi độ bão hòa nước của đất trong các thí nghiệm địa kỹ thuật quy mô phòng thí nghiệm. Đầu dò tự chế, đặc trưng bởi thiết kế đơn giản và dễ triển khai, cung cấp một giải pháp thay thế thực tế và hiệu quả về chi phí cho các cảm biến thương mại đất tiền hiện có trên thị trường. Mọi quan hệ giữa điện trở suất của đất và độ bão hòa nước trong cát sạch hạt trung bình được tìm thấy là rất nhất quán với phương trình Archie, đạt được hệ số tương quan cao ($R^2 = 0.99$).

Việc ứng dụng đầu dò trong thử nghiệm thoát nước thẳng đứng một chiều đã chứng minh khả năng mạnh mẽ của nó trong việc bắt trọn sự biến đổi theo không gian - thời gian của độ bão hòa dọc theo một cột đất 700 mm. Hệ thống theo dõi đã xác định hiệu quả vùng chuyển tiếp giữa các điều kiện bão hòa và không bão hòa khi mặt ướt tiến dần xuống dưới theo thời gian.

Sự so sánh giữa các phép đo dựa trên điện trở suất và phương pháp xử lý ảnh cho thấy sự đồng nhất mạnh mẽ, được chứng minh bởi mối tương quan cao trong Hình 7. Cụ thể, tại dấu mốc 10 phút, đầu dò đạt được độ chính xác cao nhất với RMSE là 0,0783, chứng minh tính hiệu quả của nó trong việc bắt trọn các thay đổi độ bão hòa tức thời. Việc tích hợp bộ lọc giá trị ngoại lai trong phân tích hình ảnh đã củng cố thêm hệ thống kiểm chứng.

Nghiên cứu đã xây dựng và kiểm chứng thành công phương pháp tích hợp giữa kỹ thuật đo điện trở suất và phân tích ảnh kỹ thuật số nhằm quan trắc sự phân bố không gian độ bão hòa nước trong mô hình cột đất. Phương pháp xử lý ảnh đóng vai trò như một kỹ thuật viễn thám cận cảnh hiệu quả, giúp nội suy và tái lập bản đồ không gian độ ẩm liên tục dọc theo chiều cao cột đất 700mm. Giải pháp này mở ra hướng ứng dụng chi phí thấp nhưng hiệu quả cao trong các bài toán quan trắc địa kỹ thuật, địa vật lý môi trường và giám sát biến dạng đất.

Mặc dù các kết quả chứng minh rằng đầu dò được phát triển có thể bắt trọn hiệu quả cả giá trị và sự biến đổi không gian của độ bão hòa, nghiên cứu này vẫn bị giới hạn trong các điều kiện phòng thí nghiệm sử dụng cát sạch đồng đều. Độ rỗng được giả định là hằng số và không thay đổi trong quá trình thoát nước. Do đó, các nghiên cứu tiếp theo là cần

thiết để mở rộng khả năng áp dụng của đầu dò điện trở suất này cho các loại đất phức tạp hơn, chẳng hạn như đất sét hoặc đất mặn, và để đánh giá hiệu suất của nó dưới các điều kiện hiện trường đa dạng.

Kết quả của xử lý ảnh cũng còn sai lệch so với đầu dò điện trở với sai số lớn nhất $RMSE = 0.1116$. Nguyên nhân có thể do thiết lập mối quan hệ giữa giá trị độ ẩm và độ sáng chưa được tối ưu và ảnh xử lý là ảnh được chụp ngoài bề mặt trụ mẫu, chưa đặc trưng cho toàn bộ mẫu đất. Do đó, định hướng các nghiên cứu sau này cho phương pháp xử lý ảnh là tiến hành đo, minh chứng và tối ưu mô hình tính toán cho nhiều loại đất với nhiều điều kiện môi trường thay đổi khác nhau.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, cùng Khoa Kỹ thuật Địa chất và Dầu khí đã tạo điều kiện thuận lợi và hỗ trợ kinh phí/cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. Chúng tôi cũng xin chân thành cảm ơn Ban quản lý và các cán bộ tại Phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật (Trường Đại học Bách khoa) đã nhiệt tình hỗ trợ kỹ thuật, thiết bị và cung cấp các số liệu thực nghiệm quý giá để nhóm hoàn thành nghiên cứu.

Cam kết của các tác giả

Tất cả các tác giả có tên trong bài báo cam kết sự đồng thuận và không có xung đột lợi ích trong công bố khoa học tại bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] K. L. Bristow, G. J. Kluitenberg, C. J. Goding, and T. S. Fitzgerald, "A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 31, no. 3, pp. 265–280, May 2001.
- [2] Y. Mualem and S. P. Friedman, "Theoretical Prediction of Electrical Conductivity in Saturated and Unsaturated Soil," *Water Resour. Res.*, vol. 27, no. 10, pp. 2771–2777, Oct. 1991. <https://doi.org/10.1029/91WR01095>
- [3] J. D. Rhoades and J. van Schilfgaarde, "An Electrical Conductivity Probe for Determining Soil Salinity," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 40, no. 5, pp. 647–651, Sep. 1976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000050016x>
- [4] J. D. Rhoades, "Predicting Bulk Soil Electrical Conductivity versus Saturation Paste Extract Electrical Conductivity Calibrations from Soil Properties," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 45, no. 1, pp. 42–44, 1981.
- [5] D. Yuval and W. Oldenburg, "DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems: results from the Copper Cliff mine tailings impoundments," *J. Appl. Geophys.*, vol. 34, no. 3, pp. 187–198, Apr. 1996.
- [6] A. Kemna, A. Binley, A. Ramirez, and W. Daily, "Complex resistivity tomography for environmental applications," *Chem. Eng. J.*, vol. 77, no. 1–2, pp. 11–18, Apr. 2000.
- [7] G. L. Yoon and J. B. Park, "Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils," *J. Hazard. Mater.*, vol. 84, no. 2–3, pp. 147–161, 2001.
- [8] M. Fukue, T. Minato, M. Matsumoto, H. Horibe, and N. Taya, "Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers," *Eng. Geol.*, vol. 60, no. 1–4, pp. 361–369, Jun. 2001.
- [9] Y. Li, Z. Hu, C. Cai, X. Liu, X. Duan, J. Chang, et al., "Evaluation method of water saturation in shale: A comprehensive review," *Mar. Pet. Geol.*, vol. 128, p. 105017, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105017>
- [10] F. Ozcep, O. Tezel, and M. Asci, "Correlation between electrical resistivity and soil-water content: Istanbul and Golcuk," *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 4, no. 6, pp. 362–365, 2009.

- [11] C. Aggelopoulos, P. Klepetsanis, M. A. Theodoropoulou, K. Pomoni, and C. D. Tsakiroglou, "Large-scale effects on resistivity index of porous media," *J. Contam. Hydrol.*, vol. 77, no. 4, pp. 299–323, 2005.
- [12] S. Bhatt and P. K. Jain, "Correlation between electrical resistivity and water content of sand – a statistical approach," *Am. Int. J. Res. Sci. Technol. Eng. Math.*, vol. 6, no. 2, pp. 115–211, 2014.
- [13] K. L. Bristow, G. S. Campbell, and K. Calissendorff, "Test of a Heat-Pulse Probe for Measuring Changes in Soil Water Content," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 930–934, Jul. 1993. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700040008x>
- [14] C. Kechavarzi and K. Soga, "Determination of Water Saturation Using Miniature Resistivity Probes During Intermediate Scale and Centrifuge Multiphase Flow Laboratory Experiments," *Geotech. Test. J.*, vol. 25, no. 1, pp. 95–103, Mar. 2002.
- [15] M. Fukue, T. Inoue, Y. Fujimori, K. Tanabe, K. Kita, T. Chida, et al., "Resistivity change during transport of heavy metal in sand," *Eng. Geol.*, vol. 85, no. 1–2, pp. 46–52, May 2006.
- [16] P. Brunet, R. Clément, and C. Bouvier, "Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) – A case study in the Cevennes area, France," *J. Hydrol.*, vol. 380, no. 1–2, pp. 146–153, Jan. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.032>
- [17] F. Bellmunt, A. Marcuello, J. Ledo, P. Queralt, E. Falgàs, B. Benjumea, et al., "Time-lapse cross-hole electrical resistivity tomography monitoring effects of an urban tunnel," *J. Appl. Geophys.*, vol. 87, pp. 60–70, Dec. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.09.003>
- [18] V. N. To and T. L. Khau, "Xác định độ thấm của cát bằng phương pháp minh giải ảnh chụp cắt lớp trở kháng điện," *Vietnam J. Hydrometeorol.*, vol. 3, no. 759, pp. 64–74, Mar. 2024.
- [19] M. Fukue, T. Minato, H. Horibe, and N. Taya, "The micro-structures of clay given by resistivity measurements," *Eng. Geol.*, vol. 54, no. 1–2, pp. 43–53, Sep. 1999.
- [20] Yu, W. Gao, R. R. Shamshiri, S. Tao, Y. Ren, Y. Zhang, et al., "Review of research progress on soil moisture sensor technology," *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 32–42, 2021.
- [21] M. B. De Morais Franca, F. J. O. Morais, P. Carvalhaes-Dias, L. Cult, and J. A. S. Dias, "A Multiprobe Heat Pulse Sensor for Soil Moisture Measurement Based on PCB Technology," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 2, pp. 606–613, 2019.
- [22] M. P. Goswami, B. Montazer, and U. Sarma, "Design and Characterization of a Fringing Field Capacitive Soil Moisture Sensor," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 3, pp. 913–922, 2019.
- [23] G. Ravazzani, "Open hardware portable dual-probe heat-pulse sensor for measuring soil thermal properties and water content," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 133, pp. 9–14, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.12.012>
- [24] E. Sevostianova, S. Deb, M. Serena, D. VanLeeuwen, and B. Leinauer, "Accuracy of Two Electromagnetic Soil Water Content Sensors in Saline Soils," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 79, no. 6, pp. 1752–1759, Nov. 2015. <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj2015.07.0271>
- [25] G. Kargas and K. X. Soulis, "Performance evaluation of a recently developed soil water content, dielectric permittivity, and bulk electrical conductivity electromagnetic sensor," *Agric. Water Manag.*, vol. 213, pp. 568–579, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.002>
- [26] K. Xu, Q. Sheng, X. Zhang, ... Li, and S. Chen, "Design and calibration of the unilateral sensitive soil moisture sensor," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 8, pp. 4587–4594, 2015.
- [27] Y. L. Then, K. Y. You, M. N. Dimon, and C. CY. Lee, "A modified microstrip ring resonator sensor with lumped element modeling for soil moisture and dielectric predictions measurement," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 94, pp. 119–125, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.046>
- [28] Y. Kojima, R. Shigeta, N. Miyamoto, Y. Shirahama, K. Nishioka, M. Mizoguchi, et al., "Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor," *Sensors*, vol. 16, no. 8, pp. 1–14, 2016.
- [29] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and I. Karakousis, "Laboratory characterization and modeling of DC electrical resistivity of sandy soil with variable water resistivity and content," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 5, pp. 3063–3072, 2017.
- [30] M. S. Kumar, T. R. Chandra, D. P. Kumar, and M. S. Manikandan, "Monitoring moisture of soil using low-cost homemade Soil moisture sensor and Arduino UNO," in *Proceedings of*

- 2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), IEEE, 2016, pp. 1–4.
- [31] K. R. Dongur, P. Tandekar, and S. K. Purve, "Digital Image Processing: Its History and Application," *Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 6, no. 6, pp. 364–367, 2017.
- [32] M. S. AS, H. Abdullah, H. Syahputra, B. Benaissa, and F. Harahap, "An Image Processing Techniques Used for Soil Moisture Inspection and Classification," in *Proceedings of the 4th International Conference on Innovation in Education, Science and Culture (ICIESC 2022)*, Medan, Indonesia: EAI, 2022. <http://eudl.eu/doi/10.4108/eai.11-10-2022.2325509>
- [33] F. Terribile and E. A. FitzPatrick, "The application of multilayer digital image processing techniques to the description of soil thin sections," *Geoderma*, vol. 55, no. 1–2, pp. 159–174, Oct. 1992.
- [34] G. E. Archie, "The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics," *Trans. AIME*, vol. 146, no. 1, pp. 54–62, Dec. 1942.
- [35] N. V. To, M. T. Pham, and G. T. Nguyen, "Using Image analysis method to determine the degree of saturation of unsaturated sand," *J. Pol. Miner. Eng. Soc.*, vol. 2, no. 1/55, pp. 652–665, 2025. <https://doi.org/10.29227/IM-2025-01-02-001>

Article © 2026 by Magazine of Geodesy - Cartography is licensed under CC BY 4.0

