

Tổng quan về ứng dụng của phương pháp chụp ảnh điện trở suất (ERT) trong đánh giá không phá hủy vật liệu xây dựng

A review of Electrical Resistivity Tomography (ERT) applications in non-destructive evaluation of construction materials

Nguyễn Tuấn Anh

Nhóm nghiên cứu Khoa học và công nghệ ứng dụng cho sự phát triển bền vững (STASD), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: tuananh.nguyen@ut.edu.vn

Ngày nhận bài: 3/6/2024; Ngày chấp nhận đăng: 15/7/2024

Tóm tắt:

Phương pháp chụp ảnh điện trở suất (ERT) đang ngày càng được chú ý trong lĩnh vực đánh giá không phá hủy vật liệu và kết cấu xây dựng. Bài báo tập trung vào việc phân tích các nghiên cứu gần đây về ứng dụng ERT trong kiểm tra không phá hủy bê tông và gỗ, chú trọng vào ba ứng dụng chính: Phát hiện khuyết tật, xác định vết nứt và đánh giá sự xâm nhập độ ẩm. Nghiên cứu phân tích sâu về cơ sở lý thuyết, bao gồm nguyên lý hoạt động, mô hình hóa bài toán thuận và nghịch, cũng như các phương pháp xử lý và tái tạo hình ảnh. Kết quả cho thấy ERT có khả năng phát hiện hiệu quả các khuyết tật bên trong, vết nứt nhỏ và gradient độ ẩm trong các cấu trúc bê tông và gỗ. Tuy nhiên, vẫn còn những thách thức về độ phân giải và độ nhạy, đặc biệt, trong môi trường vật liệu không đồng nhất. Bài báo cũng thảo luận các cải tiến gần đây và đề xuất hướng nghiên cứu trong tương lai để nâng cao hiệu quả của ERT, hướng tới việc ứng dụng rộng rãi hơn trong ngành công nghiệp xây dựng.

Từ khóa: Chụp ảnh điện trở suất ERT; Phương pháp không phá hủy; Bê tông; Gỗ.

Abstract:

Electrical Resistance Tomography (ERT) has been proven as an effective tool in geotechnical engineering, with numerous applications in geological surveys, groundwater assessment, and contamination detection. Recognizing the immense potential of ERT, many scientists have developed and extended its application to the evaluation of construction materials, particularly concrete. This paper reviews and evaluates recent studies on the application of ERT in non-destructive testing of concrete, focussing on three main applications: Defect detection, crack identification, and moisture penetration assessment. The study provides an in-depth analysis of the theoretical foundations, including operating principles, forward and inverse problem modeling, as well as image processing and reconstruction methods that have been adapted to suit the characteristics of concrete. Results from various experiments demonstrate ERT's capability to effectively detect internal defects, fine cracks, and moisture gradients in concrete structures. However, challenges remain regarding resolution and sensitivity, especially in heterogeneous concrete environments. The paper also discusses recent improvements and proposes future research directions to enhance the effectiveness of ERT in concrete evaluation, aiming towards wider application in the construction industry.

Keywords: Electrical Resistance Tomography (ERT); Non-Destructive Testing; Concrete; Timber.

1. Giới thiệu

Các phương pháp kiểm tra không phá hủy (Non-Destructive Testing - NDT) đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá tình trạng và đặc tính của vật liệu xây dựng, không gây hư hại đến kết cấu [1], [2], [3]. NDT cho phép thực hiện kiểm tra định kỳ, phát hiện sớm các khuyết tật tiềm ẩn, và đưa ra các biện pháp bảo trì kịp thời, từ đó, góp phần nâng cao độ tin cậy và kéo dài tuổi thọ của công trình.

Nhiều phương pháp NDT đã được phát triển và áp dụng rộng rãi trong lĩnh vực đánh giá vật liệu xây dựng. Các kỹ thuật phổ biến bao gồm siêu âm [4], [5], [6], [7], [8], chụp X-quang [9], [10], [11], [12], [13], gamma [14], [15], radar xuyên đất (GPR) [16], [17], [18], [19],... Mỗi phương pháp có những ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với những ứng dụng cụ thể trong đánh giá các đặc tính khác nhau của vật liệu. Mặc dù các phương pháp như sử dụng tia gamma, tia X và chụp ảnh neutron có độ phân giải cao, nhưng chúng thường chỉ áp dụng cho các mẫu vật nhỏ (từ vài mm đến vài cm, tùy thuộc vào thiết bị và cường độ nguồn) do yêu cầu năng lượng lớn khi chụp ảnh các mẫu vật lớn. Thêm vào đó, các phương pháp sử dụng tia gamma, tia X và neutron là những phương pháp xâm lấn và chủ yếu giới hạn trong phòng thí nghiệm do yêu cầu về cơ sở vật chất, chẳng hạn chụp ảnh neutron cần có nguồn neutron như lò phản ứng hạt nhân [20].

Trong bối cảnh đó, ERT (Electrical Resistance Tomography) được biết đến như một phương pháp NDT mới đầy tiềm năng cho việc đánh giá vật liệu xây dựng. ERT là một kỹ thuật tạo ảnh dựa trên việc đo lường sự phân bố điện trở suất bên trong vật liệu thông qua một dãy điện cực gắn trên bề mặt đối tượng. ERT là một phương pháp kiểm tra không phá hủy hữu hiệu trong địa vật lý [21], [22], được áp dụng rộng rãi để phân biệt các loại đất đá [23], [24], xác định cấu trúc địa chất [25], [26], [27], tìm kiếm nước ngầm [28], [29], [30], [31], sạt lở

[22], [32], [33], phát hiện ô nhiễm [34], [35], [36] và thăm dò khoáng sản [24].

ERT đã chứng minh hiệu quả trong lĩnh vực khảo sát địa kỹ thuật, việc áp dụng nó để đánh giá vật liệu xây dựng vẫn còn tương đối mới mẻ và đang được tích cực nghiên cứu. Việc điều chỉnh công cụ cũng như phương pháp ERT từ lĩnh vực địa kỹ thuật sang đánh giá vật liệu xây dựng đòi hỏi nhiều thách thức cần được giải quyết. Có thể kể đến những việc như điều chỉnh cấu hình điện cực cho phù hợp với hình dạng và kích thước của các cấu kiện xây dựng, phát triển các thuật toán tái tạo hình ảnh phù hợp với đặc tính của vật liệu, và xử lý các vấn đề về độ phân giải, độ nhạy trong môi trường vật liệu không đồng nhất.

Bài báo này nhằm mục đích đánh giá việc ứng dụng và cải tiến ERT trong lĩnh vực đánh giá không phá hủy vật liệu xây dựng. Nghiên cứu tập trung vào việc phân tích các điều chỉnh và cải tiến cần thiết để chuyển đổi ERT từ công cụ khảo sát địa kỹ thuật thành phương pháp hiệu quả cho đánh giá vật liệu xây dựng. Các khía cạnh được xem xét bao gồm nguyên lý hoạt động, cấu hình đo lường, thuật toán xử lý dữ liệu, và ứng dụng cụ thể trong việc đánh giá các loại vật liệu xây dựng thông dụng như bê tông và gỗ. Thông qua việc tổng hợp và phân tích các nghiên cứu hiện có, bài báo hướng đến việc cung cấp một cái nhìn toàn diện về tiềm năng và thách thức của ERT trong lĩnh vực đánh giá không phá hủy vật liệu xây dựng. Kết quả của nghiên cứu này góp phần thúc đẩy việc phát triển và ứng dụng rộng rãi hơn của ERT trong ngành công nghiệp xây dựng, đồng thời, đề xuất các hướng nghiên cứu trong tương lai để cải thiện hiệu quả và độ tin cậy của phương pháp.

2. Nguyên lý và ứng dụng của phương pháp ERT

Phương pháp ERT là một kỹ thuật khảo sát không phá hủy nhằm xác định phân bố đa chiều của các đặc tính điện trong môi trường nghiên cứu, có thể áp dụng cho đất và vật liệu xây

dụng. Quy trình thực hiện ERT bao gồm hai giai đoạn chính:

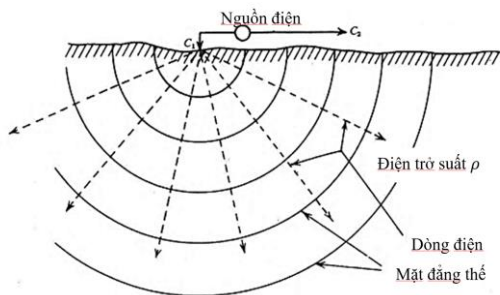
Thu thập dữ liệu: Một dòng điện xác định được truyền vào môi trường thông qua một cặp điện cực, được gọi là điện cực dòng. Đồng thời, hiệu điện thế được đo giữa một cặp điện cực khác, được gọi là điện cực thế. Quá trình này được lặp lại với nhiều cấu hình điện cực khác nhau trên bề mặt của đối tượng nghiên cứu, tạo ra một tập hợp các phép đo điện trở suất biểu kiến tại nhiều vị trí và độ sâu khác nhau.

Xử lý dữ liệu: Các số liệu đo thu thập, được đưa vào một quy trình nghịch đảo. Quy trình này sử dụng các thuật toán tối ưu hóa để tái tạo phân bố điện trở suất thực của môi trường, nhằm phù hợp nhất với dữ liệu đo đạc.

Kết quả cuối cùng là một mô hình hai hoặc ba chiều phân bố điện trở suất trong đối tượng nghiên cứu. Mô hình này cho phép các nhà khoa học suy luận về cấu trúc và tính chất của môi trường dựa trên sự biến đổi của điện trở suất.

2.1. Cơ sở lý thuyết của phương pháp ERT

Xét mô hình lý tưởng hóa của một môi trường bán vô hạn, đồng nhất và đẳng hướng với điện trở suất ρ . Trong cấu hình này, một cặp điện cực dòng được thiết lập, với điện cực nguồn C_1 đặt tại một điểm xác định trên bề mặt và điện cực C_2 được đặt ở khoảng cách vô cùng xa so với kích thước của vùng khảo sát (Hình 1).



Hình 1. Mặt đẳng thế và các dòng điện xung quanh một nguồn điểm.

Khi một hiệu điện thế được áp đặt giữa hai điện cực này, một dòng điện I được thiết lập trong môi trường. Do điện cực C_2 được đặt ở khoảng cách rất xa, có thể giả định rằng các đường dòng điện phân bố đều theo hình bán cầu xung quanh

điện cực C_1 , với mật độ dòng giảm dần theo khoảng cách từ điện cực nguồn.

Cấu hình này được minh họa trong Hình 1, trong đó, các mặt đẳng thế hình thành các bề mặt bán cầu đồng tâm xung quanh điện cực C_1 , trong khi các đường dòng điện lan truyền theo hướng xuyên tâm từ điện cực nguồn. Mô hình này cho phép áp dụng các nguyên lý của điện trường trong môi trường liên tục để phân tích sự phân bố điện thế và mật độ dòng điện trong không gian ba chiều xung quanh điện cực nguồn [37], [38].

Trong mô hình môi trường bán vô hạn, mật độ dòng điện J được xác định bằng cách chia cường độ dòng điện I cho diện tích bề mặt khi dòng điện đi qua. Xét một bề mặt bán cầu bán kính r , tâm tại điện cực nguồn, có diện tích $S = 2\pi r^2$. Mật độ dòng điện được biểu diễn bởi công thức:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1)$$

Trong đó:

J : Mật độ dòng điện (A/m^2);

I : Cường độ dòng điện (A);

r : Khoảng cách từ điểm đang xét đến điện cực nguồn (m).

Định luật Ohm trong môi trường liên tục có dạng:

$$J = \sigma \text{grad}V = \frac{\text{grad}V}{\rho} \quad (2)$$

Trong đó, σ là độ dẫn điện của môi trường. Điện thế V tại một điểm được tính:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (3)$$

Với thế điện do nhiều nguồn, trong trường hợp có nhiều nguồn điện (n nguồn) đặt trên bề mặt, điện thế tại điểm M được tính bằng:

$$V_M = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{I_1}{r_1} + \frac{I_2}{r_2} + \dots + \frac{I_n}{r_n} \right) \quad (4)$$

Trong đó:

V_M : Thế điện tại điểm M;

ρ : Điện trở suất của môi trường;

I_n : Cường độ dòng điện tại nguồn thứ n;

r_n : Khoảng cách từ điểm M đến nguồn dòng điện thứ n.

Trong lĩnh vực địa chất, dòng điện một chiều được đưa vào lòng đất nhằm nghiên cứu sự phân bố điện thế, từ đó, suy ra phân bố điện trở suất trong lòng đất. Đối với môi trường đồng nhất và đẳng hướng, giá trị điện trở suất đo được chính là điện trở suất thực. Tuy nhiên, đối với môi trường không đồng nhất, khái niệm điện trở suất biểu kiến được sử dụng.

Điện trở suất biểu kiến được định nghĩa là tỷ số giữa điện thế đo được và điện thế tính toán lý thuyết trong cùng điều kiện (cùng cấu hình điện cực, cùng cường độ dòng điện đưa vào) cho một môi trường đồng nhất có điện trở suất đơn vị [37].

Trong thực tế, việc đo điện trở suất biểu kiến $\rho_{app}(\Omega m)$ được thực hiện trên bề mặt đất, sử dụng hai điện cực C_1 và C_2 , gọi là các điện cực dòng. Một dòng điện có cường độ $I_{C_1C_2}(mA)$ được đưa vào đất qua hai điện cực này, cho phép đo hiệu điện thế $\Delta V_{P_1P_2}(mV)$ giữa hai điện cực khác P_1 và P_2 , gọi là các điện cực thế. Giá trị đo được tích hợp điện trở suất của một thể tích nhất định thuộc môi trường được khảo sát. Áp dụng biểu thức (4), điện thế tại điện cực P_1 và P_2 có dạng lý thuyết như sau:

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_1P_2} + \frac{1}{C_2P_2} \right) \quad (5)$$

Điện trở suất biểu kiến được tính theo công thức:

$$\rho_{app} = K \frac{\Delta V_{P_1P_2}}{I_{C_1C_2}} \quad (6)$$

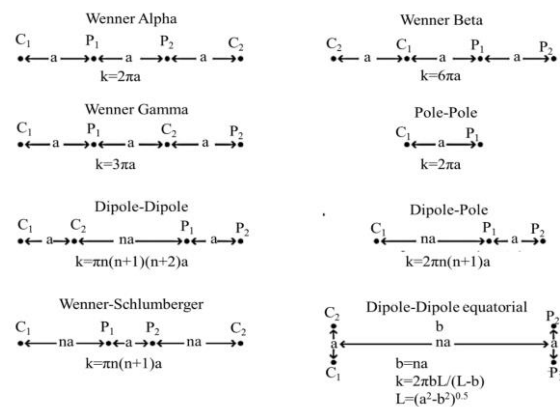
Trong đó, K là hệ số hình học có dạng lý thuyết như sau:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_1P_2} + \frac{1}{C_2P_2} \right)} \quad (7)$$

Phương pháp này cho phép thu thập dữ liệu về điện trở suất biểu kiến của môi trường địa chất, từ đó, có thể suy ra cấu trúc và tính chất của các lớp đất đá bên dưới bề mặt.

2.2. Cấu hình đo điện trở suất

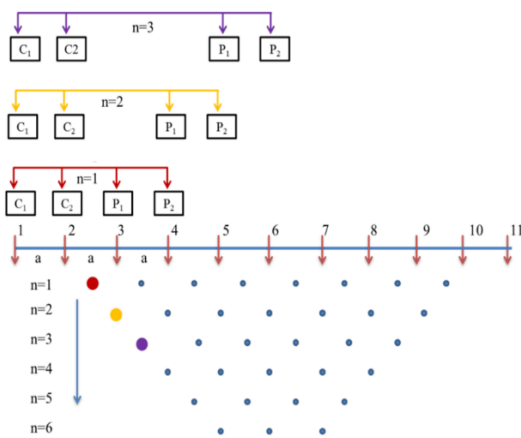
Trong khảo sát điện trở suất, việc lựa chọn cấu hình điện cực đóng vai trò quan trọng trong việc xác định độ sâu khảo sát, độ phân giải và độ nhạy với các cấu trúc địa chất khác nhau. Các cấu hình phổ biến nhất bao gồm Wenner, Schlumberger, Dipole-Dipole, Pole-Dipole và Pole-Pole (Hình 2) [39], [40], [41]. Mỗi cấu hình có những ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với các mục tiêu khảo sát cụ thể [37]. Cấu hình Wenner, với bốn điện cực cách đều nhau, được biết đến với tín hiệu mạnh và độ nhạy tốt với cấu trúc nằm ngang. Cấu hình Schlumberger, một biến thể của Wenner với khoảng cách giữa các điện cực dòng lớn hơn, phù hợp cho khảo sát độ sâu và ít nhạy cảm với nhiễu bề mặt. Dipole-Dipole, sử dụng hai cặp điện cực riêng biệt, cung cấp độ phân giải ngang tốt nhưng có tín hiệu yếu hơn. Pole-Dipole kết hợp ưu điểm của cả Wenner và Dipole-Dipole, trong khi đó, Pole-Pole cho phép khảo sát ở độ sâu lớn nhất nhưng có độ phân giải thấp nhất [38]. Việc lựa chọn cấu hình phụ thuộc vào nhiều yếu tố như mục tiêu khảo sát, điều kiện địa chất, hạn chế về thiết bị và địa hình. Trong nhiều trường hợp, các nhà địa vật lý sử dụng kết hợp nhiều cấu hình để tận dụng ưu điểm và khắc phục hạn chế của từng loại.



Hình 2. Một số cấu hình đo thông dụng và hệ số hình học tương ứng [37].

2.3. Phương pháp thu thập dữ liệu

Trong quá trình thu thập dữ liệu 2D, thông thường sử dụng một số lượng lớn điện cực được kết nối với một hệ thống cáp đa điện cực liên kết với bộ chuyển mạch đa kênh (multiplexer). Hệ thống này cho phép thực hiện nhiều kết hợp đo lường theo cả chiều dọc (thay đổi khoảng cách giữa các điện cực) và chiều ngang (di chuyển hệ đo bốn cực theo chiều ngang). Bằng cách kết hợp quét theo cả phương dọc và phương ngang, nguyên lý đo này cho phép tái tạo bản đồ điện trở suất có dạng hình tháp, như được minh họa trong Hình 3.



Hình 3. Thu thập dữ liệu 2D bằng cấu hình Dipole-Dipole [42].

2.4. Bài toán thuận

Bài toán thuận trong phương pháp đo điện trở suất đóng vai trò quan trọng trong mô phỏng và hiểu rõ quá trình phân bố điện thế của môi trường địa chất. Bản chất của bài toán này là xác định giá trị điện thế tại các điểm đo trên bề mặt, dựa trên cấu trúc điện trở suất đã biết của môi trường và cấu hình nguồn điện được áp dụng.

Cơ sở lý thuyết của bài toán thuận bắt nguồn từ mối quan hệ giữa mật độ dòng điện và nguồn điện trong một thể tích nhỏ được mô tả bằng phương trình Poisson [43]. Khi xét một nguồn dòng điện $I(x_s, y_s, z_s)$ trong một thể tích V_0 , phương trình mô tả sự phân bố điện thế xung quanh điểm nguồn được biểu diễn bởi:

$$\Delta J = \frac{I}{\Delta V} \delta(x-x_s) \delta(y-y_s) \delta(z-z_s) \quad (8)$$

Trong đó, δ là hàm delta Dirac. Phương trình này mô tả sự phân bố điện thế xung quanh một điểm nguồn [43]. Bài toán thuận có thể được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn [37] hoặc phương pháp phần tử hữu hạn [39], [40].

2.5. Bài toán ngược

Trong bài toán thuận, điện trở suất biểu kiến được tính toán dựa trên một mô hình địa chất giả định. Đây là một đại lượng tích hợp, phản ánh tính chất điện của một thể tích đất đá nhất định, không phải là điện trở suất thực tại một điểm cụ thể. Ngược lại, bài toán nghịch [46] là quá trình xác định cấu trúc điện trở suất thực của lòng đất từ các giá trị điện trở suất biểu kiến đo được [40], [45], [47], [48], [49]. Đây là một bài toán phức tạp do tính không duy nhất của nghiệm và sự không tuyến tính trong mối quan hệ giữa dữ liệu và tham số mô hình [47].

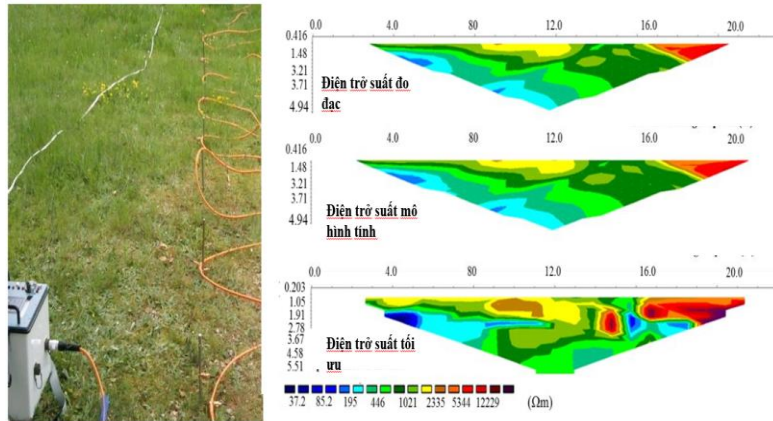
Quy trình nghịch đảo bắt đầu bằng việc xây dựng một mô hình ban đầu, thường là đồng nhất hoặc có cấu trúc đơn giản. Tiếp theo, điện trở suất biểu kiến lý thuyết được tính toán sử dụng các phương pháp số như phần tử hữu hạn hoặc sai phân hữu hạn. Sau đó, sự khác biệt giữa điện trở suất biểu kiến tính toán và đo đạc được đánh giá bằng phương pháp bình phương tối thiểu. Mô hình được điều chỉnh sử dụng các thuật toán tối ưu hóa như Gauss-Newton [37], [38], [42], Quasi Newton [50], Levenberg-Marquardt [15], [42], [48]. Quá trình này được lặp lại cho đến khi đạt được tiêu chí hội tụ.

Một trong những thách thức chính của mô hình hóa nghịch đảo là tính không duy nhất của nghiệm. Nhiều mô hình khác nhau có thể cho kết quả tương tự về điện trở suất biểu kiến, đòi hỏi sự kết hợp với thông tin địa chất bổ sung để giảm thiểu tính không duy nhất này. Ngoài ra, việc lựa chọn điều kiện biên phù hợp trong mô hình số cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo tính chính xác của kết quả [46].

Độ nhạy của dữ liệu đối với các thay đổi trong tham số mô hình giảm theo độ sâu, dẫn đến độ phân giải thấp hơn ở các lớp sâu hơn. Điều này tạo ra một thách thức trong việc giải

thích cấu trúc địa chất ở độ sâu lớn. Hơn nữa, dữ liệu thực tế thường chứa nhiễu, có thể ảnh hưởng đáng kể đến quá trình nghịch đảo.

Trong thực tế, phần mềm Res2Dinv được sử dụng rộng rãi như một công cụ mạnh mẽ trong nghịch đảo dữ liệu chụp ảnh điện trở suất [23],



Hình 4. Ví dụ thực tế về phép đo ERT và kết quả phân tích [42].

3. Ứng dụng ERT cho vật liệu bê tông

ERT là một kỹ thuật kiểm tra không phá hủy đầy hứa hẹn cho bê tông, được nghiên cứu và phát triển trong những năm gần đây. ERT cho phép tạo ra hình ảnh 3D của phân bố điện trở suất bên trong bê tông, cung cấp thông tin quý giá về cấu trúc và tình trạng của vật liệu.

Điện trở suất của bê tông có thể biến đổi trong một phạm vi rộng, từ 10^5 đến $10^7 \Omega m$, phụ thuộc vào độ ẩm của môi trường bê tông và thành phần vật liệu.

3.1. Phát hiện và định vị cốt thép/khuyết tật

Để đánh giá khả năng ứng dụng của phương pháp ERT cho bê tông, Karhunen và cộng sự đã tiến hành nhiều thí nghiệm trên các mẫu bê tông được chuẩn bị đặc biệt [52]. Các mẫu này được thiết kế để mô phỏng các tình huống khác nhau có thể gặp trong các kết cấu bê tông thực tế. Các nhà nghiên cứu đã đúc các mẫu bê tông hình trụ ngắn có đường kính 15 cm và chiều cao 3 cm. Thành phần bê tông bao gồm 83% cốt liệu, 15% xi măng Portland và 2% tro bay (theo khối lượng). Kích thước cốt liệu tối đa là 8 mm và tỷ lệ nước/xi măng được chọn là 0,8, cho cường

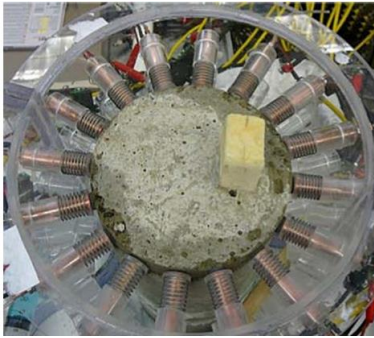
[51]. Phần mềm này cho phép tự động tạo lưới mô hình dựa trên cấu hình điện cực, lựa chọn linh hoạt giữa các phương pháp tối ưu hóa khác nhau, tích hợp các ràng buộc và thông tin tiên nghiệm, cũng như hiển thị kết quả dưới dạng mặt cắt 2D hoặc 3D của điện trở suất [49].

độ nén từ 20 đến 25 MPa. Điều này tạo ra một loại bê tông có đặc tính tương đối phổ biến trong xây dựng.

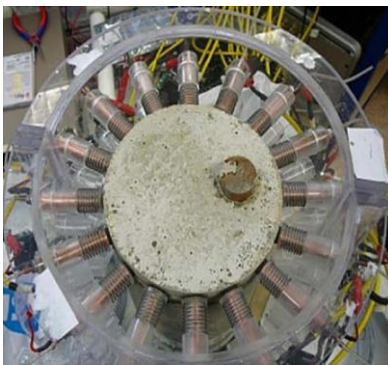
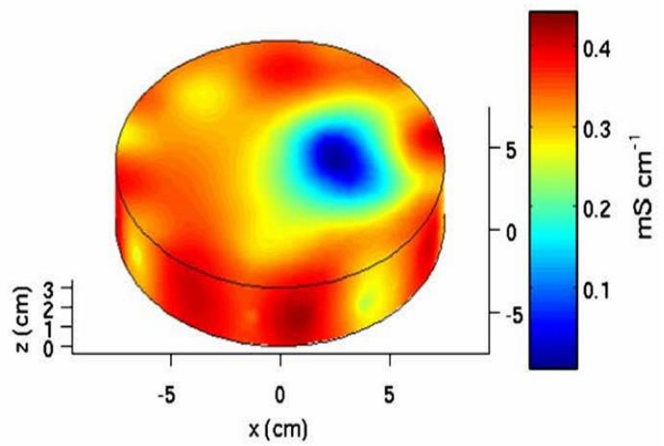
Để mô phỏng các khuyết tật và cấu trúc bên trong bê tông, các nhà nghiên cứu đã đúc bốn loại vật thể khác nhau vào trong các mẫu:

- Khối polyurethane, đại diện cho các lỗ rỗng lớn hoặc vật liệu cách điện;
- Thanh thép đứng, mô phỏng cốt thép dọc;
- Thanh thép nằm ngang, tương tự như cốt thép ngang hoặc đai thép;
- Các tấm nhựa, có thể đại diện cho các vết nứt hoặc lớp tách trong bê tông.

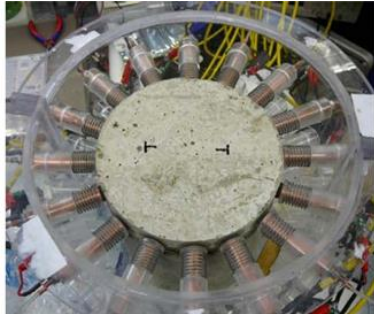
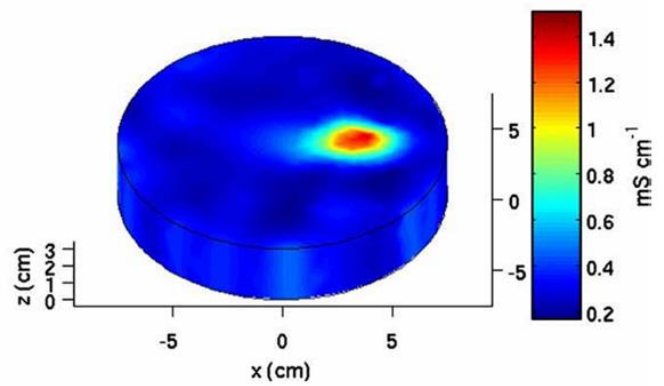
Các vật thể này được chọn lựa cẩn thận để tạo ra sự tương phản về độ dẫn điện so với bê tông, giúp đánh giá khả năng phát hiện và phân biệt của phương pháp ERT. Quá trình bảo dưỡng mẫu được thực hiện cẩn thận để đảm bảo tính đồng nhất và kiểm soát độ ẩm. Sau khi đúc, các mẫu được giữ trong khuôn kín cho đến khi đủ cứng để tháo khuôn. Sau đó, chúng được bọc bằng nhựa để duy trì độ ẩm đồng đều.



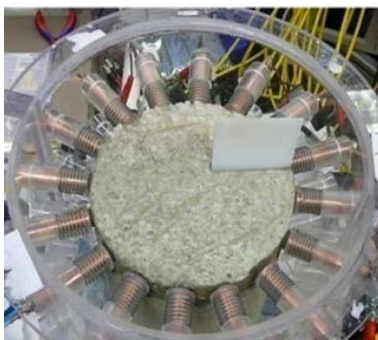
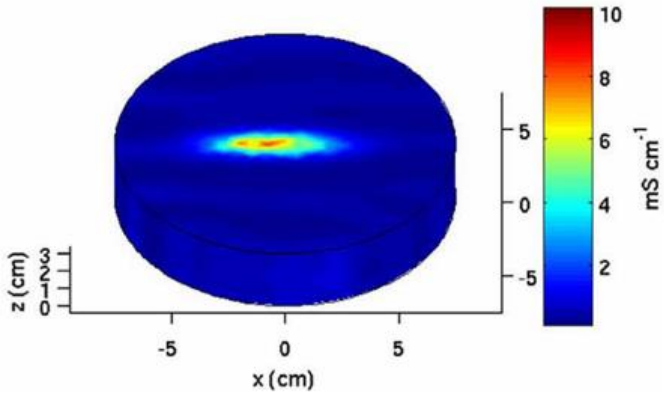
Khối polyurethane, đại diện cho các lỗ rỗng lớn hoặc vật liệu cách điện.



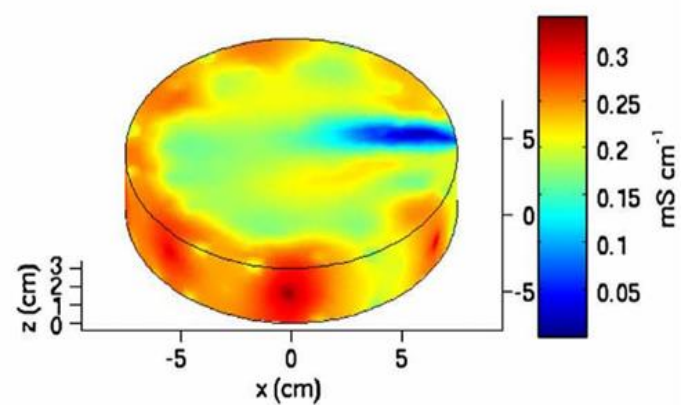
Thanh thép đứng.



Thanh thép nằm ngang.



Các tấm nhựa.



Hình 5. Kết quả cho mẫu thử với các khuyết tật được mô phỏng (bên trái) và độ dẫn điện được tính toán tương ứng (bên phải) [52].

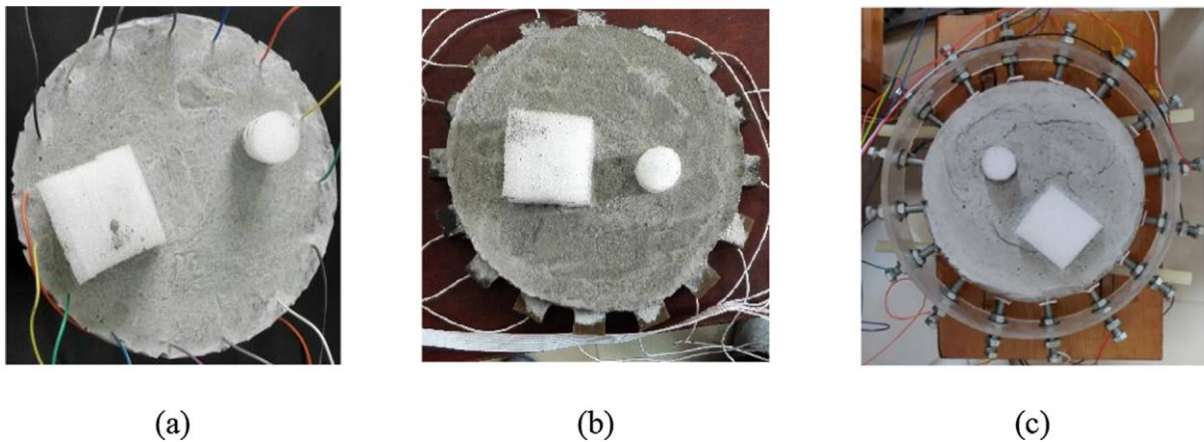
Mẫu thử với khối polyurethane cho thấy độ dẫn điện giảm rõ rệt tại vị trí của khối này do polyurethane là vật liệu cách điện. Độ dẫn điện của nền bê tông dao động trong khoảng từ 0,2 đến 0,44 mS/cm. Các yếu tố như mức độ bão hòa nước và độ xốp của bê tông ảnh hưởng đến sự không đồng nhất trong độ dẫn điện. Dữ liệu đo được cho thấy mô hình ERT khá chính xác trong việc dự đoán phân bố độ dẫn điện và chỉ ra mức độ không chắc chắn của các giá trị ước tính. Mẫu thử với thanh thép cho thấy thanh thép được xác định vị trí khá chính xác trong hình ảnh. Tuy nhiên, độ dẫn điện của thanh thép bị đánh giá thấp do không tính đến trở kháng tiếp xúc giữa bê tông và thanh thép, cùng với độ nhạy cảm hạn chế của phép đo điện áp biên đối với các chênh lệch độ dẫn điện lớn. Mặc dù độ dẫn điện thực tế của thép cao hơn nhiều, mô hình chỉ tái tạo được độ dẫn điện thấp hơn đáng kể. Điều này cho thấy cần cải thiện mô hình, cần xét đến các yếu tố ảnh hưởng đến mô hình để kết quả phân tích được chính xác hơn.

Trong thí nghiệm thứ ba, một thanh thép nằm ngang được đúc trong mẫu bê tông và vị trí của nó được xác định khá chính xác. Mặc dù có sự chênh lệch lớn giữa độ dẫn điện của thép và bê tông, nhưng do các điện cực chỉ được đặt trên một lớp duy nhất và đối xứng so với mặt phẳng trung tâm của mẫu, nên không thể xác định

chính xác các tọa độ theo phương thẳng đứng của thanh thép. Như vậy, cần có những cải tiến trong cấu hình đo để có thể xác định chính xác hơn vị trí ba chiều của các vật thể. Thí nghiệm cuối cùng cho thấy khả năng ước lượng độ sâu của các vết nứt trong bê tông bằng ERT với độ chính xác cao. Các tấm nhựa (cách điện) được tái tạo với độ dẫn điện gần bằng không, cho thấy sự khác biệt rõ rệt về độ sâu của các vùng không dẫn điện trong các mẫu khác nhau. Điều này chứng minh rằng ERT có thể được sử dụng hiệu quả để phát hiện và phân tích các vết nứt trong bê tông, mặc dù thực tế, các vết nứt có thể dẫn điện hoặc cách điện tùy thuộc vào độ ẩm.

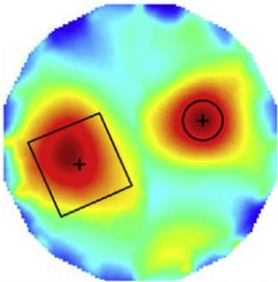
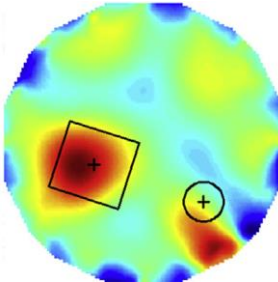
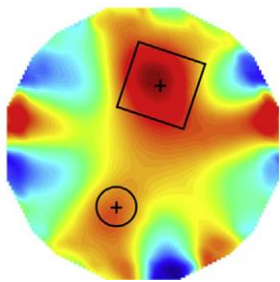
Ren và cộng sự đã ứng dụng ERT để phát hiện khuyết tật trong mẫu vữa xi măng [53]. Các tác giả đã tiến hành gồm nhiều thí nghiệm sử dụng các mẫu với những khuyết tật được đúc sẵn, đồng thời, khảo sát ảnh hưởng của những yếu tố quan trọng như tỷ lệ nước/xi măng và độ ẩm đến điện trở suất của mẫu. Nghiên cứu này đã so sánh hiệu quả của ba loại điện cực khác nhau: Điện chôn sâu, điện cực nửa chôn sâu, và điện cực gắn ngoài (Hình 6).

Kết quả cho thấy ERT có thể phát hiện hiệu quả những khuyết tật trong mẫu xi măng, với điện cực chôn sâu cho kết quả tốt nhất về độ chính xác trong việc xác định vị trí và kích thước của khuyết tật (Bảng 1).



Hình 6. Ba bộ điện cực và các mẫu tương ứng: (a) Mẫu cho các điện cực chôn sâu; (b) Mẫu cho các điện cực nửa chôn sâu; (c) Mẫu cho các điện cực gắn bên ngoài.

Bảng 1. Kết quả phân bố điện trở suất thu được với ba hình thức gắn điện trở.

	Điện cực chôn sâu	Điện cực nửa chôn sâu	Điện cực gắn ngoài
Kết quả điện trở suất			
Độ tương đồng (%)	68.3837	65.3178	42.4822

3.2. Phát hiện và định vị vết nứt

Trong nghiên cứu áp dụng phương pháp ERT để xác định vết nứt trong bê tông, các thí nghiệm thực tế đã chỉ ra sự hiệu quả của kỹ thuật này. Lataste và cộng sự đã thực hiện các thử nghiệm trên nhiều mẫu bê tông khác nhau để đánh giá khả năng của ERT trong việc phát hiện và phân tích các vết nứt [54]. Nghiên cứu tập trung vào khu vực phần trên cùng của tấm bê tông, nơi bê tông đã có tuổi đời hơn 40 năm và được lưu trữ trong điều kiện tự nhiên. Các phép đo được thực hiện trên diện tích 1 x 0,5 m², khu vực này đã được kiểm tra bằng mắt và thử nghiệm bằng búa trước đó. Lưới thép gia cường, do lớp phủ bê tông (trên 5 cm) không gây ảnh hưởng đến các phép đo điện được thực hiện trên tấm bê tông.

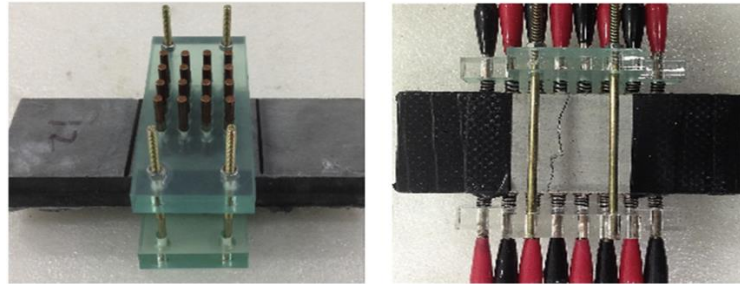
Khu vực kiểm tra được chọn vì có một vết nứt lớn và các vùng bị tách lớp. Điện trở được đo với khoảng cách đều 5 cm, cho phép vẽ bản đồ điện trở của bề mặt. Sự thay đổi điện trở rõ rệt do dòng điện được truyền song song với trục X (hướng đến vết nứt), cho thấy độ nhạy của phương pháp đối với các vết nứt và vùng bị tách lớp. Giá trị điện trở trung bình trên các khu vực bê tông có tình trạng tốt khoảng 800 Ωm (với độ nhiễu đo lường là 10%). Trong các khu vực bị tách lớp, giá trị điện trở có thể lên đến 1700 Ωm và giá trị tối đa vượt quá 3000 Ωm. Gần vết nứt và trong khu vực xung quanh, điện trở thấp hơn 200 Ωm và 400 Ωm tương ứng. Những biến động điện trở này cho phép phát hiện và xác

định vị trí các hư hại một cách rõ ràng. Sự tương phản điện trở (so với các khu vực bị hư hại và không bị hư hại) dao động khoảng hai lần, và có thể nhận thấy rằng sự thay đổi điện trở phụ thuộc vào loại rối loạn. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng phương pháp ERT rất nhạy cảm với sự có mặt của tách lớp hoặc vết nứt. Trong khi tách lớp thường không gây hại nghiêm trọng cho kết cấu, ngoại trừ, các tiêu chí thẩm mỹ, vết nứt có thể có nhiều ý nghĩa và ảnh hưởng khác nhau tùy thuộc vào loại vết nứt. Tình trạng của các vết nứt và mật độ của chúng có ảnh hưởng đến sự ăn mòn của thép gia cường, ngay cả với các vết nứt rất nhỏ. Qua đó, nghiên cứu cũng cho thấy phương pháp ERT có thể ước lượng được độ sâu của các vết nứt trong bê tông và cung cấp thông tin giá trị về tình trạng của bê tông trong các công trình xây dựng.

Gupta và cộng sự đã sử dụng ERT để đánh giá hư hỏng trong bê tông tự cảm biến dùng cho mặt đường sân bay [55]. Bê tông này được tạo ra bằng cách tăng cường giao diện xi măng - cốt liệu với màng mỏng ống nano carbon đa thành (MWCNTs). Nghiên cứu đã đưa ra một phương pháp mới để đánh giá hư hỏng trong mặt đường sân bay bê tông bằng cách kết hợp bê tông tự cảm biến với ERT [55]. Mục tiêu chính của nghiên cứu là xác nhận khả năng ứng dụng của bê tông tự cảm biến quy mô lớn trong mặt đường sân bay và sử dụng ERT để đặc trưng hóa hư hỏng phân bố không gian trong quá trình thử nghiệm gia tốc mặt đường. Bê tông tự cảm biến được chế tạo bằng cách tăng cường giao

pháp ERT đã được áp dụng để đánh giá khả năng phát hiện sự hư hỏng trong bê tông [57]. Trong nghiên cứu này, các mẫu bê tông ECC (Engineered Cementitious Composite) được kiểm tra dưới tải trọng kéo đơn trục. Những

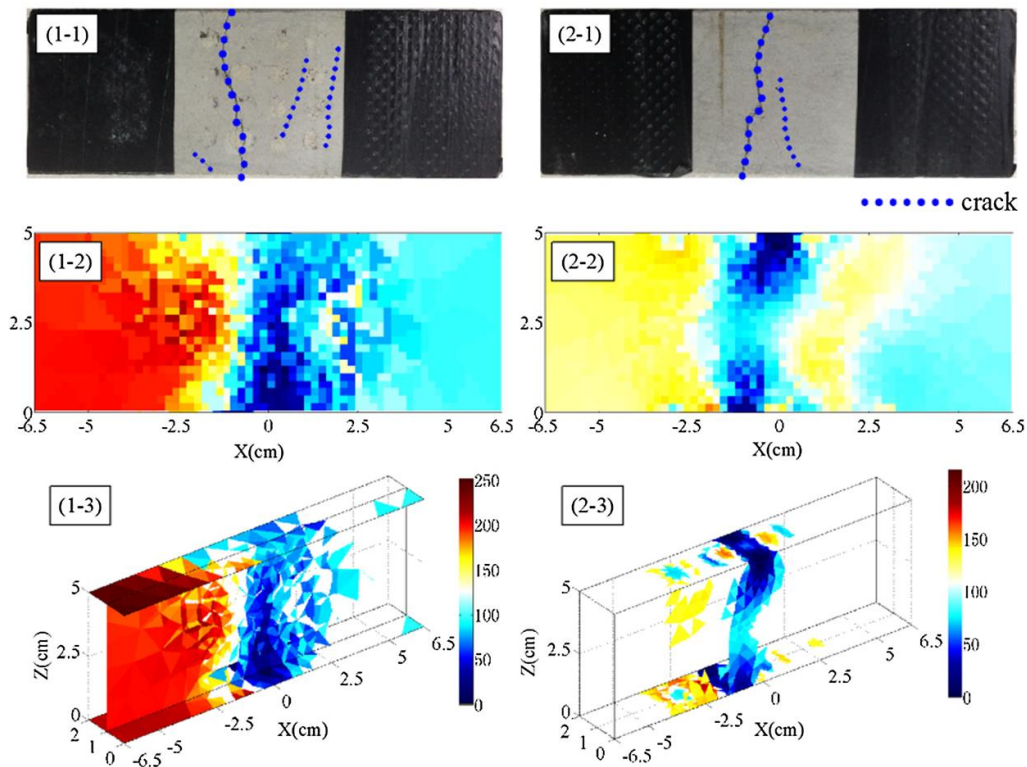
điện cực đồng được gắn lên bề mặt các mẫu bê tông và kết nối với hệ thống đo điện áp để thu thập dữ liệu về sự thay đổi điện trở khi xuất hiện các vết nứt.



Hình 9. Bố trí điện cực đối xứng (UPEA) và bố trí điện cực được sắp xếp (BEEA).

Kết quả cho thấy rằng sự thay đổi điện trở do sự phát triển của các vết nứt được phản ánh rõ ràng trong các bản đồ ERT. Cụ thể, các vết nứt lớn tạo ra vùng có điện trở cao, được hiển thị bằng

màu xanh đậm, trong khi các vết nứt nhỏ hơn được thể hiện qua các vùng màu xanh nhạt hơn. Điều này cho phép xác định chính xác vị trí và mức độ của hư hỏng trong mẫu bê tông.



Hình 10. Hình ảnh ERT cho mẫu UPEA và BEEA dưới tải trọng kéo đơn trục với ứng suất 2%.

(1-1) Mẫu UPEA với các vết nứt thực tế; (1-2) Kết quả cắt ngang của mẫu UPEA;

(1-3) Hình ảnh 3D của mẫu UPEA; (2-1) Mẫu BEEA với các vết nứt thực tế;

(2-2) Kết quả cắt ngang của mẫu BEEA ở ứng suất kéo 2.0%; (2-3) Hình ảnh 3D của mẫu BEEA.

Nghiên cứu cũng so sánh hai kiểu bố trí điện cực: Bố trí điện cực đối xứng (UPEA) và bố trí điện cực sắp xếp (BEEA) (Hình 9). Kết quả cho thấy rằng BEEA ưu việt hơn trong việc phát

hiện hư hỏng ở những khu vực khó tiếp cận, như trên các cấu trúc đã có sẵn. Ngược lại, UPEA là lựa chọn tốt hơn khi có thể bố trí các điện cực một cách dễ dàng (Hình 10).

Nghiên cứu chứng minh rằng ERT là một phương pháp không phá hủy hiệu quả để đánh giá sự phân bố điện trở bên trong bê tông, cung cấp thông tin quan trọng cho việc giám sát và bảo trì các cấu trúc bê tông.

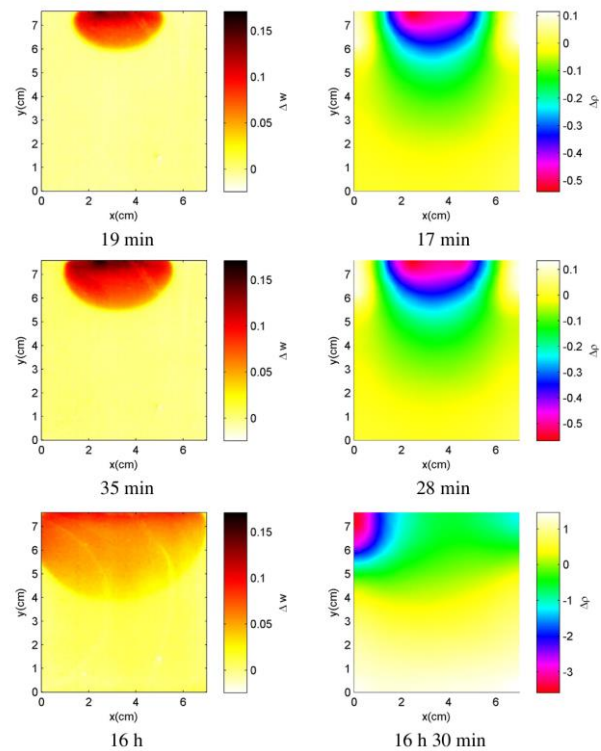
3.3. Xác định sự xâm nhập và phân bố độ ẩm trong bê tông

Nghiên cứu của Ren và cộng sự đã chỉ ra rằng độ ẩm là yếu tố chính ảnh hưởng đến điện trở suất trong giai đoạn đầu thủy hóa, trong khi tỷ lệ nước/xi măng trở thành yếu tố chính sau giai đoạn này [53]. Các tác giả cũng đã phát triển một phương pháp đánh giá chất lượng hình ảnh dựa trên biểu đồ màu, cung cấp một cách tiếp cận định lượng để so sánh hiệu quả của các cấu hình ERT khác nhau. Hallaji và cộng sự đã thực hiện nghiên cứu nhằm đánh giá khả năng của phương pháp ERT trong việc theo dõi sự xâm nhập của độ ẩm chưa bão hòa trong các vật liệu chứa xi măng [20]. Để thực hiện nghiên cứu, hai loại mẫu đã được chế tạo: Mẫu một chiều (1D) và mẫu hai chiều (2D).

Mẫu 1D được chế tạo để mô phỏng sự xâm nhập của nước theo một chiều dọc. Mẫu xi măng hình trụ được chuẩn bị và đặt trong một bể chứa nước tại một đầu. Quá trình xâm nhập của nước vào mẫu 1D được thực hiện bằng cách cho nước tiếp xúc liên tục với mặt trên của mẫu. Sự chuyển động của nước được theo dõi bằng cách chụp neutron và đo điện trở tại các thời điểm khác nhau. Kết quả cho thấy sự di chuyển của độ ẩm không đồng đều, với sự thấm nhanh hơn ở bên phải và tại các góc trên cùng của mẫu.

Mẫu 2D được thiết kế để mô phỏng sự xâm nhập của nước theo hai chiều. Mẫu xi măng hình chữ nhật được đặt trên một bề mặt ngang, và nước được cung cấp từ một nguồn nước dạng dải nằm ở phần trên cùng của mẫu. Nước lan tỏa theo nhiều hướng khác nhau từ nguồn cấp, tạo thành một vùng ẩm với hình dạng không đối xứng. Sự phân bố của nước được theo dõi qua các hình ảnh neutron và đo điện trở (Hình 11). Kết quả cho thấy vệt nước có hình dạng nghiêng

về bên trái và lan rộng theo chiều ngang, với sự tập trung độ ẩm cao ở góc trên bên trái của mẫu.



Hình 11. Hình chụp bằng tia neutron (cột bên trái) và hình ảnh ERT (cột bên phải) của mẫu với nguồn nước hai chiều (2D).

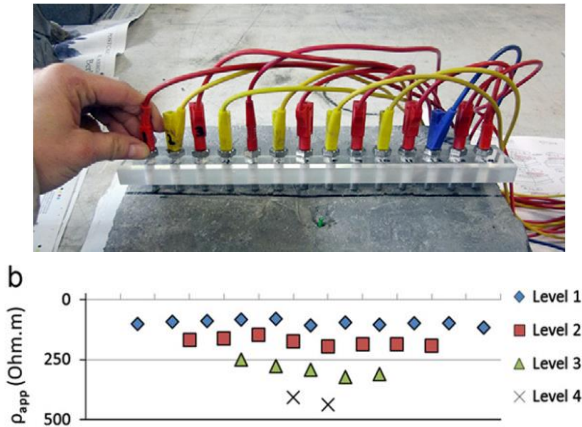
Trong cả hai trường hợp, nước được cấp vào mẫu qua các bể chứa được gắn chắc chắn bằng lớp keo silicon mỏng để đảm bảo sự tiếp xúc liên tục với mẫu. Quá trình thí nghiệm được thực hiện đồng thời với các phép đo ERT và chụp neutron. Hình ảnh neutron cung cấp thông tin định lượng chi tiết về sự phân bố độ ẩm, trong khi ERT cung cấp cái nhìn tổng quát về sự di chuyển và phân bố độ ẩm, dù không cho phép định lượng chính xác.

Kết quả nghiên cứu cho thấy ERT có khả năng cung cấp thông tin về sự phân bố độ ẩm trong các mẫu xi măng, mặc dù không đạt được độ chính xác định lượng. ERT cho phép theo dõi sự di chuyển của độ ẩm và chỉ ra các điểm không đồng đều trong sự phân bố nước, chủ yếu do sự khác biệt về độ xốp trong mẫu.

Plooy và cộng sự đã nghiên cứu và phát triển một thiết bị đo điện trở bề mặt đa điện cực, được thiết kế cho các ứng dụng thực địa, ứng dụng

ERT để đánh giá độ ẩm và hàm lượng clorua trong bê tông [58].

Cảm biến điện trở bề mặt đa điện cực được phát triển nhằm cung cấp khả năng điều tra sâu về lớp bê tông phủ, cho phép xác định các gradient độ ẩm và clorua. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng cảm biến này có khả năng phát hiện các gradient điện trở, mô tả sự phân bố độ ẩm và clorua trong bê tông (Hình 12).



Hình 12. Sắp xếp điện cực trên mẫu bê tông và kết quả điện trở suất tính toán.

4. Ứng dụng cho vật liệu gỗ

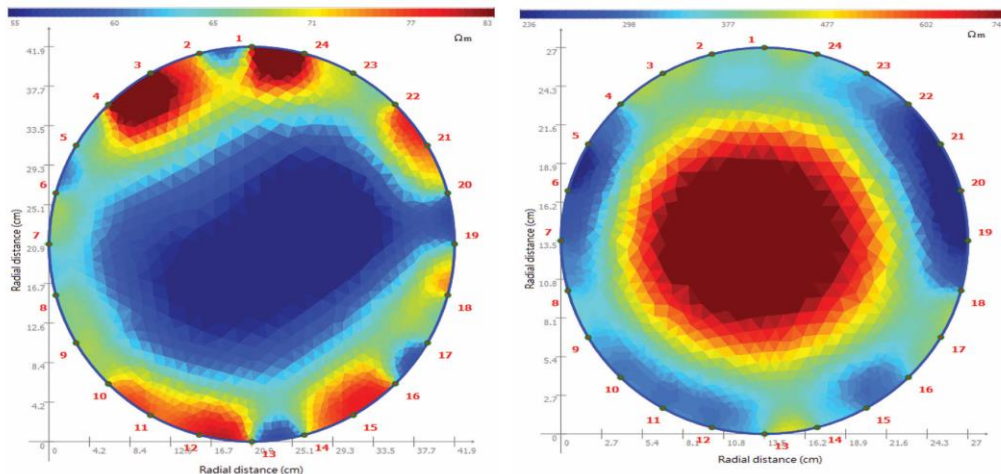
4.1. Xác định dác gỗ và lõi gỗ

Lin và cộng sự đã tiến hành một nghiên cứu nhằm khảo sát khả năng ứng dụng của phương

pháp ERT trong việc xác định ranh giới giữa dác gỗ và lõi gỗ trên ba loài cây lá kim ở châu Á: Tùng Nhật Bản (*Cryptomeria japonica* D. Don), Taiwania (*Taiwania cryptomerioides* Hayata), và thông Luanta (*Cunninghamia konishii* Hayata). Mục tiêu chính là thiết lập một phương pháp không phá hủy để xác định vị trí ranh giới dác gỗ và lõi gỗ trên cây sống [59].

Nhóm nghiên cứu đã sử dụng hệ thống đo điện trở đa kênh ERT trên tổng cộng 39 cây mẫu. Các phép đo được thực hiện tại mặt cắt ngang của thân cây, sử dụng 24 điện cực được bố trí đều quanh chu vi. Sau khi thu thập dữ liệu ERT, nhóm nghiên cứu xây dựng bản đồ giá trị điện trở suất, lấy mẫu lõi gỗ để xác định vị trí ranh giới dác gỗ và lõi gỗ bằng phương pháp quan sát trực tiếp.

Kết quả nghiên cứu cho thấy có mối tương quan chặt chẽ giữa tổng giá trị điện trở suất lớn nhất, nhỏ nhất từ dữ liệu ERT và giá trị điện trở suất tại ranh giới dác gỗ - lõi gỗ. Mối quan hệ này được biểu diễn bằng các phương trình hồi quy tuyến tính với hệ số xác định (R^2) cao cho cả ba loại: 0,925 đối với tùng Nhật Bản, 0,989 đối với Taiwania, và 0,80 đối với thông Luanta.



Hình 13. Bản đồ giá trị ERT tương ứng (Ωm) của cây Taiwania và cây thông Luanta.

Nghiên cứu còn chỉ ra sự khác biệt đáng kể về mẫu phân bố điện trở suất giữa các loài cây. Tùng Nhật Bản và Taiwania có điện trở suất cao ở vùng ngoài cùng của thân cây và thấp ở vùng

trung tâm, trong khi thông Luanta có xu hướng ngược lại (Hình 13). Điều này phản ánh sự khác biệt về cấu trúc và đặc tính sinh lý giữa các loài, đặc biệt là sự phân bố độ ẩm và các chất điện

phân trong thân cây. Các giá trị điện trở suất trung bình của dác gỗ và lõi gỗ cũng được xác định cho từng loài, với thông Luanta có giá trị cao hơn đáng kể so với hai loài còn lại. Điều này gợi ý rằng phương pháp ERT không chỉ có thể xác định ranh giới dác gỗ và lõi gỗ còn có tiềm năng trong việc phân biệt các đặc tính vật lý và sinh lý khác của gỗ giữa các loài cây.

4.2. Xác định độ ẩm trên thân cây sống

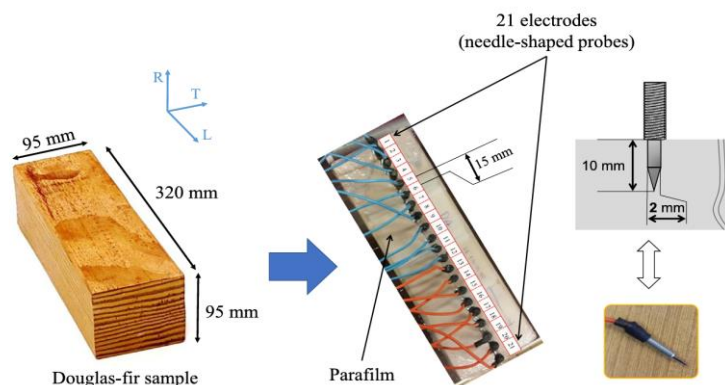
Nghiên cứu của Martin và cộng sự được thực hiện tại ba khu rừng ở vùng Massif Central, Pháp, với 58 cây thông bạc khỏe mạnh [60]. Kỹ thuật ERT đã được áp dụng để đo độ điện trở của gỗ trong suốt hơn một năm, trong khi các mẫu lõi gỗ được thu thập để đo hàm lượng độ ẩm thực tế. Kết quả cho thấy 90% số cây thông bạc có sự hiện diện của ẩm trong gỗ lõi. Hơn nữa, có mối tương quan đáng kể giữa hàm lượng độ ẩm gỗ lõi đo từ các lõi gỗ và điện trở trung bình thu được từ ERT.

Nghiên cứu cho thấy ERT là một công cụ đáng tin cậy để ước lượng hàm lượng độ ẩm của gỗ thông bạc trong trạng thái cây đứng. Tuy nhiên, mặc dù ERT có thể ước lượng hàm lượng độ ẩm trung bình của gỗ lõi, dữ liệu từ ERT có sự thay đổi theo mùa và không cho phép xác định chính xác vị trí của vùng gỗ ẩm. Phương pháp này có thể hỗ trợ trong việc quản lý và khai thác nguồn tài nguyên gỗ thông bạc hiệu quả hơn, giúp giảm chi phí trong quá trình chế biến, đặc biệt là trong giai đoạn sấy khô, nhờ cung cấp thông tin chính xác hơn về các thuộc tính nội bộ của gỗ trong rừng.

4.3. Đánh giá độ ẩm trong các cấu kiện gỗ

Hafsa và cộng sự đã tiến hành nghiên cứu nhằm phát triển một phương pháp kết hợp thực nghiệm - mô hình số để đánh giá phân bố độ ẩm trong gỗ thông Bắc Mỹ (*Pseudotsuga menziesii*), bằng cách sử dụng kỹ thuật chụp cắt lớp điện trở (ERT) [15]. Nghiên cứu sử dụng mẫu gỗ kích thước 320 x 95 x 95 mm³, với 21 điện cực dạng kim được lắp đặt dọc theo chiều dài mẫu. Các phép đo điện trở được thực hiện bằng thiết bị Syscal Junior Switch 48 với cấu hình cực Dipole-Dipole. Để mô phỏng quá trình khuếch tán ẩm, nhóm nghiên cứu đã sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn (FDM), đồng thời, phát triển một mô hình phần tử hữu hạn (FEM) để mô phỏng việc đo điện trở.

Kết quả nghiên cứu cho phép xác định các tham số khuếch tán ẩm của gỗ thông Bắc Mỹ và mô phỏng thành công sự phân bố độ ẩm theo thời gian và không gian trong mẫu gỗ. Phân bố điện trở dọc theo chiều dài mẫu gỗ cũng được xác định thông qua phương pháp đảo ngược số. Đặc biệt, nghiên cứu đã thiết lập mối quan hệ logarit giữa điện trở và độ ẩm với hệ số tương quan $R^2 = 0.95$. Phương pháp này cho thấy tiềm năng ứng dụng trong việc đánh giá độ ẩm của các cấu kiện gỗ thuộc công trình xây dựng, góp phần nâng cao hiệu quả bảo trì và kéo dài tuổi thọ của công trình gỗ. Tuy nhiên, các tác giả cũng chỉ ra cần nghiên cứu thêm để cải thiện phương pháp, đặc biệt là trong điều kiện khô và cần xem xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ cũng như tính bất đẳng hướng của gỗ trong các nghiên cứu tiếp theo.



Hình 14. 21 điện cực đặc biệt được gắn trên mẫu gỗ thông Bắc Mỹ (Douglas fir).

4.4. Triển vọng ứng dụng cho vật liệu trong tương lai

Phương pháp ERT đã và đang chứng minh tiềm năng to lớn trong việc đánh giá không phá hủy vật liệu và kết cấu xây dựng. Trong tương lai, ERT có triển vọng phát triển theo nhiều hướng nhằm nâng cao hiệu quả và mở rộng phạm vi ứng dụng cho nhiều loại vật liệu khác nhau.

Một trong những hướng phát triển quan trọng là cải thiện độ phân giải và độ nhạy của kỹ thuật. Điều này có thể đạt được thông qua việc phát triển các thuật toán xử lý và tái tạo hình ảnh tiên tiến hơn, cũng như tối ưu hóa cấu hình điện cực và phương pháp thu thập dữ liệu. Những cải tiến này cho phép ERT phát hiện và phân tích các khuyết tật nhỏ hơn trong nhiều loại vật liệu như bê tông, gỗ.

Xu hướng ứng dụng ERT trong giám sát kết cấu thực cũng đang được chú trọng phát triển. Các hệ thống ERT tích hợp liên tục có thể theo dõi sự thay đổi của vật liệu và kết cấu theo thời gian, đóng vai trò quan trọng trong các hệ thống cảnh báo sớm cho các công trình quan trọng. Điều này đặc biệt hữu ích cho việc giám sát độ ẩm trong các cấu kiện gỗ, phát hiện sự xâm nhập của chloride trong bê tông, hay theo dõi độ ẩm trong các kết cấu gạch đất nện...

5. Kết luận

Phương pháp ERT đã chứng minh là một công cụ đánh giá không phá hủy đầy tiềm năng có thể áp dụng trong lĩnh vực vật liệu và kết cấu xây dựng. Bài báo này đã phân tích và tổng hợp các nghiên cứu hiện có về ứng dụng ERT trong đánh giá các loại vật liệu quan trọng thuộc xây dựng như bê tông, gỗ cũng như triển vọng phát triển trong tương lai.

Trong lĩnh vực bê tông, ERT đã chứng tỏ hiệu quả khi phát hiện khuyết tật, định vị cốt thép, xác định vị trí và mức độ của vết nứt, cũng như đánh giá sự xâm nhập của độ ẩm và chloride. Đối với gỗ, ERT cho thấy tiềm năng trong việc phân biệt các loại gỗ và lõi gỗ, xác định

độ ẩm trên thân cây sống, và đánh giá độ ẩm trong các cấu kiện gỗ.

Mặc dù có tiềm năng lớn, ERT vẫn phải đối mặt với một số thách thức đáng kể. Một trong những hạn chế chính là vấn đề về độ phân giải và độ nhạy, đặc biệt trong môi trường vật liệu không đồng nhất như bê tông. Khả năng phân biệt và định lượng các đặc tính vật liệu một cách chính xác cần được cải thiện thông qua các nghiên cứu sâu hơn. Ngoài ra, việc giải thích kết quả ERT đôi khi còn phức tạp và đòi hỏi chuyên môn cao, gây khó khăn trong việc ứng dụng rộng rãi kỹ thuật này. Để giải quyết vấn đề này, cần phát triển các thuật toán và phần mềm hỗ trợ nhằm đơn giản hóa quá trình phân tích và diễn giải dữ liệu, giúp kỹ thuật dễ tiếp cận hơn với người dùng cuối.

Một thách thức quan trọng khác là sự hạn chế trong ứng dụng thực tế của ERT liên quan đến lĩnh vực vật liệu và kết cấu xây dựng. Tuy đã chứng minh được tiềm năng nhưng vẫn chưa có nhiều ứng dụng cụ thể. Để khắc phục điều này, cần mở rộng nghiên cứu và thử nghiệm ERT trên nhiều loại vật liệu xây dựng khác nhau, từ đó khám phá toàn bộ tiềm năng của kỹ thuật này. Đồng thời, việc phát triển các giải pháp về thiết bị đo đạc và phân tích phù hợp với đặc thù của từng loại vật liệu và kết cấu là rất cần thiết. Cải tiến thiết bị hiện có và thiết kế các hệ thống mới cần chú trọng đến tính linh hoạt và khả năng thích ứng với các điều kiện môi trường đa dạng trong xây dựng.

Để khai thác đầy đủ tiềm năng của ERT, cần tiến hành nhiều nghiên cứu thực nghiệm hơn nhằm xác định các thông số tối ưu cho việc áp dụng ERT trên các loại vật liệu khác nhau. Việc phát triển các phương pháp chuẩn hóa trong thu thập, xử lý và giải thích dữ liệu ERT cho vật liệu xây dựng cũng là một hướng nghiên cứu quan trọng. Những nỗ lực này đòi hỏi sự phối hợp chặt chẽ giữa các nhà nghiên cứu, kỹ sư và nhà sản xuất thiết bị.

Tóm lại, dù còn tồn tại một số thách thức, ERT vẫn thể hiện tiềm năng to lớn trong lĩnh

vực đánh giá vật liệu xây dựng. Việc giải quyết các thách thức này không chỉ mở rộng phạm vi ứng dụng của ERT còn nâng cao đáng kể hiệu quả và độ tin cậy của kỹ thuật này trong đánh giá không phá hủy vật liệu xây dựng. Với những nỗ lực nghiên cứu và phát triển tiếp theo, ERT có thể trở thành một công cụ quan trọng trong việc đảm bảo an toàn và chất lượng của các công trình xây dựng trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

- [1] G. Boccacci, F. Frasca, C. Bertolin, and A. M. Siani, "Diagnosis of historic reinforced concrete buildings: A literature review of non-destructive testing (NDT) techniques," *Procedia Structural Integrity*, vol. 55, pp. 160-167, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.02.021.
- [2] G. G. K. Reddy, P. Kulkarni, P. R. Rao, V. Ravekar, and N. Kanhe, "Experimental studies on behavior of hybrid materials concrete using non-destructive testing (NDT) methods," *materialstoday: Proceedings*, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.061.
- [3] Z. -M. Sbartai, D. Breyse, M. Larget, and J.-P. Balayssac, "Combining NDT techniques for improved evaluation of concrete properties," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 6, pp. 725-733, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.03.005.
- [4] L. G. Anoni, V. G. Haach, and L. Khazanovich, "Image reconstruction in concrete ultrasound tomography: A systematic review," *Construction and Building Materials*, vol. 441, Aug. 2024, Art. no. 137472, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137472.
- [5] S. Beniwal and A. Ganguli, "Defect detection around rebars in concrete using focused ultrasound and reverse time migration," *Ultrasonics*, vol. 62, pp. 112-125, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.ultras.2015.05.008.
- [6] E. Bernat-Maso, E. Teneva, C. Escrig, and L. Gil, "Ultrasound transmission method to assess raw earthen materials," *Construction and Building Materials*, vol. 156, pp. 555-564, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.012.
- [7] N. Bouhamed et al., "Ultrasound evaluation of the mechanical properties as an investigation tool for the wood-polymer composites including olive wood flour," *Mechanics of Materials*, vol. 148, Sep. 2020, Art. no. 103445, doi: 10.1016/j.mechmat.2020.103445.
- [8] L. Zhang et al., "The volumetric ultrasound imaging strategy for quantification of the defects in concrete based on the optimized cumulative kurtosis method," *NDT & E International*, vol. 147, Oct. 2024, Art. no. 103203, doi: 10.1016/j.ndteint.2024.103203.
- [9] M. Middendorf, C. Umbach, J. Liu, and E. A. B. Koenders, "Contact area analysis of an asphalt-concrete boundary layer with X-ray computed tomography imaging," *Construction and Building Materials*, vol. 430, Jun. 2024, Art. no. 136497, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136497.
- [10] Z. Ning et al., "Crack propagation and non-uniform deformation analysis in hydraulic asphalt concrete: Insights from X-ray CT scanning and digital volume correlation," *Construction and Building Materials*, vol. 411, Jan. 2024, Art. no. 134704, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134704.
- [11] J. Taheri-Shakib and A. Al-Mayah, "Applications of X-ray computed tomography to characterize corrosion-induced cracking evolution in reinforced concrete: A review," *J. Build. Eng.*, vol. 90, Aug. 2024, Art. no. 109420, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109420.
- [12] Y. Tian et al., "Corrosion damages of reinforced concrete characterized by X-ray CT and DVC techniques," *Construction and Building Materials*, vol. 409, Dec. 2023, Art. no. 134218, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134218.
- [13] Y. Zhang and X. Zhu, "Evaluation of pore and fiber distribution characteristics of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete using X-ray computed tomography," *J. Build. Eng.*, vol. 80, Dec. 2023, Art. no. 108105, doi: 10.1016/j.jobe.2023.108105.
- [14] A. F. Nielsen, "Gamma-ray-attenuation used for measuring the moisture content and homogeneity of porous concrete," *Building*

- Science*, vol. 7, no. 4, pp. 257-263, Dec. 1972, doi: 10.1016/0007-3628(72)90007-2.
- [15] W. Hafsa et al., "Assessment of moisture content profile in douglas-fir wood using electrical resistivity-based tomography," *Construction and Building Materials*, vol. 366, Feb. 2023, Art. no. 130193, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130193.
- [16] D. P. Bigman and D. J. Day, "Ground penetrating radar inspection of a large concrete spillway: A case-study using SFCW GPR at a hydroelectric dam," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, Jun. 2022, Art. no. e00975, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00975.
- [17] G. P. Dinanta et al., "Case study of ground penetration radar (GPR) to assess lead migration," *Results in Geophysical Sciences*, vol. 14, Jun. 2023, Art. no. 100055, doi: 10.1016/j.ringps.2023.100055.
- [18] G. M. Vasques et al., "Ground penetrating radar (GPR) models of the regolith and water reservoir of an underground dam in the Brazilian semiarid region," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 206, Nov. 2022, Art. no. 104797, doi: 10.1016/j.jappgeo.2022.104797.
- [19] Y. Zhou and W. W. L. Lai, "Characterization of leakage signatures in buried water pipes by ground penetrating radar (GPR) and instantaneous frequency analysis," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 153, , Nov. 2024, Art. no. 105984doi: 10.1016/j.tust.2024.105984.
- [20] M. Hallaji, A. Seppänen, and M. Pour-Ghaz, "Electrical resistance tomography to monitor unsaturated moisture flow in cementitious materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 69, pp. 10-18, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.11.007.
- [21] J. D. Ducut et al., "A review of electrical resistivity tomography applications in underground imaging and object detection," *Displays*, vol. 73, Jul. 2022, Art. no. 102208, doi: 10.1016/j.displa.2022.102208.
- [22] A. Perrone, V. Lapenna, and S. Piscitelli, "Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review," *Earth-Science Reviews*, vol. 135, pp. 65-82, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.earscirev.2014.04.002.
- [23] S. Tavakoli, G. Gilbert, A. O. K. Lysdahl, R. Frauenfelder, and C. S. Forsberg, "Goelectrical properties of saline permafrost soil in the Adventdalen valley of Svalbard (Norway), constrained with in-situ well data," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 195, Dec. 2021, Art. no. 104497, doi: 10.1016/j.jappgeo.2021.104497.
- [24] R. Arjwech, P. Sriwangpon, K. Somchat, P. Pondthai, and M. Everett, "Electrical resistivity tomography (ERT) data for clay mineral mapping," *Data in Brief*, vol. 30, Jun. 2020, Art. no. 105494, doi: 10.1016/j.dib.2020.105494.
- [25] X. Liu, J. Shen, M. Yang, G. Cai, and S. Liu, "Subsurface characterization of a construction site in Nanjing, China using ERT and CPTU methods," *Eng. Geol.*, vol. 299, Mar. 2022, Art. no. 106563, doi: 10.1016/j.enggeo.2022.106563.
- [26] P. Stummer, H. Maurer, and A. G. Green, "Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information," *Geophysics*, vol. 69, no. 1, pp. 120-139, Jan. 2004, doi: 10.1190/1.1649381.
- [27] A. P. Aizebeokhai, A. A. Oni, K. D. Oyeyemi, and O. Ogungbade, "Electrical resistivity imaging (ERI) data for characterising crystalline basement structures in Abeokuta, southwestern Nigeria," *Data in Brief*, vol. 19, pp. 2393-2397, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.07.034.
- [28] A. M. Youssef et al., "Sinkholes induced by uncontrolled groundwater withdrawal for agriculture in arid Saudi Arabia. Integration of remote-sensing and geophysical (ERT) techniques," *J. Arid Environ.*, vol. 177, Jun. 2020, Art. no. 104132, doi: 10.1016/j.jaridenv.2020.104132.
- [29] U. B. Nisar, S. A. Ehsan, M. I. Rafiq, and M. R. Mughal, "Integrated study for assessing groundwater dynamics of the Dehdan village, Haripur Basin, Pakistan," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 227, Aug. 2024, Art. no. 105419, doi: 10.1016/j.jappgeo.2024.105419.
- [30] U. Mukhwathi and F. Fourie, "The influence of angled survey lines on 2D ERT surveys using the Wenner (α) array with implications for

- groundwater exploration in Karoo rocks,” *Journal of African Earth Sciences*, vol. 168, Aug. 2020, Art. no. 103875, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2020.103875.
- [31] Ł. Kaczmarek et al., “Electrical resistivity imaging data for hydrogeological and geological investigations of Szusalewo peatland (North-East Poland),” *Data in Brief*, vol. 55, Aug. 2024, Art. no. 110626, doi: 10.1016/j.dib.2024.110626.
- [32] P. Imani, G. Tian, S. Hadiloo, and A. A. El-Raouf, “Application of combined electrical resistivity tomography (ERT) and seismic refraction tomography (SRT) methods to investigate Xiaoshan District landslide site: Hangzhou, China,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 184, Jan. 2021, Art. no. 104236, doi: 10.1016/j.jappgeo.2020.104236.
- [33] J. Luhn, M. J. Stumvoll-Schmaltz, A. F. Orozco, and T. Glade, “Internal structure of an active landslide based on ERT and DP data: New insights from the Hofermühle landslide observatory in Lower Austria,” *Geomorphology*, vol. 441, Nov. 2023, Art. no. 108910, doi: 10.1016/j.geomorph.2023.108910.
- [34] S. Park, P. Tsourlos, and S. Shin, “Electrical resistivity tomography (ERT) monitoring of leachate seepage from an animal carcass waste (ACW) facility, South Korea,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 206, Nov. 2022, Art. no. 104809, doi: 10.1016/j.jappgeo.2022.104809.
- [35] J. E. Chambers, O. Kuras, P. I. Meldrum, R. D. Ogilvy, and J. Hollands, “Electrical resistivity tomography applied to geological, hydrogeological and engineering investigations at a former waste disposal site (Shortened form of title : Resistivity imaging of waste),” 2012. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:85519535>
- [36] G. Vargemezis, P. Tsourlos, A. Giannopoulos, and P. Trilyrakis, “3D electrical resistivity tomography technique for the investigation of a construction and demolition waste landfill site,” *Stud. Geophys. Geod.*, vol. 59, pp. 461-476, 2015, doi: 10.1007/s11200-014-0146-5.
- [37] D. M. H. Loke, *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. 2004.
- [38] M. H. Loke, J. E. Chambers, D. F. Rucker, O. Kuras, and P. B. Wilkinson, “Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 95, pp. 135-156, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.017.
- [39] W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, *Applied Geophysics*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
- [40] M. H. Loke, *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. 2021.
- [41] Q. -B. Bui and J. -C. Morel, “Assessing the anisotropy of rammed earth,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 9, pp. 3005-3011, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.04.011.
- [42] N. T. Anh, “Approches expérimentales et numériques pour l’étude des transferts hygroscopiques dans le bois,” *Génie civil*, Université de Limoges, Français, 2014.
- [43] A. Dey and H. F. Morrison, “Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures,” *Geophysics*, vol. 44, no. 4, pp. 753–780, Apr. 1979, doi: 10.1190/1.1440975.
- [44] A. L. Codd and L. Gross, “Electrical Resistivity Tomography using a finite element based BFGS algorithm with algebraic multigrid preconditioning,” *Geophys. J. Int.*, vol. 212, no. 3, pp. 2073–2087, Mar. 2018, doi: 10.1093/gji/ggx511.
- [45] B. P. Lamichhane and L. Gross, “Inversion of geophysical potential field data using the finite element method,” *Inverse Probl.*, vol. 33, no. 12, Art. no. 125009, Nov. 2017, doi: 10.1088/1361-6420/aa8cb0.
- [46] M. Zhdanov, Ed. “Geophysical inverse theory and regularization problem,” in *Methods in Geochemistry and Geophysics*, vol. 36. 2002.
- [47] T. Günther, C. Rücker, and K. Spitzer, “Three-dimensional modelling and inversion of dc

- resistivity data incorporating topography - II. Inversion,” *Geophys. J. Int.*, vol. 166, no. 2, pp. 506-517, Aug. 2006, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03011.x.
- [48] T. A. Nguyen, “Numeric validation of the inversion model of electrical resistivity imaging method using the levenberg-marquardt algorithm,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 12806-12811, Feb. 2024, doi: 10.48084/etasr.6705.
- [49] A. Pidlisecky, E. Haber, and R. Knight, “RESINVM3D: A 3D resistivity inversion package,” *Geophysics*, vol. 72, no. 2, pp. H1–H10, Mar. 2007, doi: 10.1190/1.2402499.
- [50] C. G. Broyden, “Quasi-Newton methods and their application to function minimisation,” *Math. Comput.*, vol. 21, pp. 368-381, 1967.
- [51] S. F. Yasir, J. Jani, and M. Mukri, “A dataset of visualization methods to assessing soil profile using RES2DINV and VOXLER software,” *Data in Brief*, vol. 24, Art. no. 103821, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.dib.2019.103821.
- [52] K. Karhunen, A. Seppänen, A. Lehtikoinen, P. J. M. Monteiro, and J. P. Kaipio, “Electrical Resistance Tomography imaging of concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 1, pp. 137-145, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.08.023.
- [53] H. Ren et al., “Visualized investigation of defect in cementitious materials with electrical resistance tomography,” *Construction and Building Materials*, vol. 196, pp. 428-436, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.129.
- [54] J. F. Lataste, C. Sirieix, D. Breysse, and M. Frappa, “Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering,” *NDT & E International*, vol. 36, no. 6, pp. 383-394, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0963-8695(03)00013-6.
- [55] S. Gupta et al., “In situ crack mapping of large-scale self-sensing concrete pavements using electrical resistance tomography,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 122, Art. no. 104154, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104154.
- [56] M. Hallaji and M. Pour-Ghaz, “A new sensing skin for qualitative damage detection in concrete elements: Rapid difference imaging with electrical resistance tomography,” *NDT & E International*, vol. 68, pp. 13-21, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.ndteint.2014.07.006.
- [57] X. Zhou, P. Bhat, H. Ouyang, and J. Yu, “Localization of cracks in cementitious materials under uniaxial tension with electrical resistance tomography,” *Construction and Building Materials*, vol. 138, pp. 45-55, May 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.128.
- [58] R. Du Plooy, S. Palma Lopes, G. Villain, and X. Dérobert, “Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition,” *NDT & E International*, vol. 54, pp. 27-36, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.ndteint.2012.11.007.
- [59] C. -J. Lin, C. -H. Chung, T. -H. Yang, and F. -C. Lin, “Detection of electric resistivity tomography and evaluation of the sapwood-heartwood demarcation in three Asia Gymnosperm species,” *Silva Fenn.*, vol. 46, no. 3, 2012, doi: 10.14214/sf.440.
- [60] L. Martin, H. Cochard, S. Mayr, and E. Badel, “Using electrical resistivity tomography to detect wetwood and estimate moisture content in silver fir (*Abies alba* Mill.),” *Ann. For. Sci.*, vol. 78, no. 3, Art. no. 65, Sep. 2021, doi: 10.1007/s13595-021-01078-9.