

XÁC ĐỊNH CẤU TRÚC NỀN ĐỊA CHẤT VÀ NHẬN DẠNG CÁC HANG NGẦM BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐO ẢNH ĐIỆN ĐA CỰC

DETERMINING THE GEOLOGICAL STRUCTURE AND UNDERGROUND CAVES USING A MULTI-ELECTRODE RESISTIVITY IMAGING METHOD

ĐỖ TRỌNG QUỐC^{a,*}

^aTrường Đại học khoa học tự nhiên

*Tác giả đại diện: Email: quocdotrong@vnn.edu.vn

Ngày nhận 03/3/2024, Ngày sửa 28/3/2024, Chấp nhận 30/3/2024

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol1-9>

Tóm tắt: Tại biến sụt lún thường xuyên xảy ra ở Việt Nam không chỉ ở khu vực miền núi mà cả khu vực đồng bằng và trong các khu dân cư đông đúc. Khu vực nghiên cứu thuộc tỉnh Thanh Hóa đã từng ghi nhận các vụ sụt lún đất xảy ra trong quá khứ. Trên cơ sở các kết quả đo địa vật lý bằng phương pháp ảnh điện đa cực đã xác định được: 1) Khu vực nghiên cứu nằm trên nền địa hình karst với hệ thống các hang ngầm lớn và dày đặc; 2) Nền địa chất khu vực nghiên cứu gồm 04 lớp tương ứng với các giá trị điện trở suất khác nhau gồm lớp phủ bề mặt ($\rho = 5 \div 39 \Omega m$), lớp phong hóa mạnh ($\rho = 40 \div 150 \Omega m$), lớp ít phong hóa ($\rho = 151 \div 214 \Omega m$) và lớp đá tươi ($\rho > 214 \Omega m$); 3) Có 03 dạng hang karst tại khu vực nghiên cứu gồm: các hang hở dạng hàm ếch bị lấp nhét bởi vật liệu trầm tích ở bên trên và chứa nhiều nước với độ sâu trung bình từ $7 \div 15m$; các hang kín không chứa nước được bao quanh bởi đá gốc bị phong hóa mạnh; các hang kín chứa nước hoặc vật liệu bề mặt ngậm nhiều nước có khả năng gây ra sụt lún cao.

Từ khóa: Sụt lún, phương pháp đo ảnh điện đa cực, karst

Abstract: Subsidence hazards are common in Vietnam, occurring not only in mountainous regions but also in densely populated delta areas. There have been numerous subsidence incidents recorded in Thanhhoa province in the past. The results of geophysical measurements using the multi-electrode resistivity imaging method show: 1) The study area is located in an area of karst topography which includes a complex network of large and dense underground caves. 2) The geological structure of the study area can be divided into four layers with different resistivity anomalies, including a sedimentary cover ($\rho = 13 \div 39 \Omega m$), strongly weathered layer ($\rho = 40 \div 150 \Omega m$), less weathered layer ($\rho = 151 \div 214 \Omega m$), and bedrock layer ($\rho > 214 \Omega m$); 3) Caves in the research area have 3 characteristics including cleft-shaped caves filled

with sediment originating from the soil surface and containing a lot of water with an average depth of $7 \div 15m$; sealed caves surrounded by heavily weathered bedrock and no water inside; sealed caves containing water or hydrated material have a high risk of causing subsidence.

Keywords: Land subsidence, multi-electrode resistivity imaging method, karst

1. Đặt vấn đề

Sụt lún là hiện tượng bề mặt đất chìm dần hoặc chìm xuống một cách đột ngột [7]. Nguyên nhân gây ra sụt lún là do sự mất cân bằng vật chất giữa các tầng địa chất bên trên và bên dưới. Các vật chất ở tầng dưới di chuyển hoặc mất đi như nước, dầu – khí, hoặc tài nguyên khoáng sản do quá trình tự nhiên (động đất, hạn hán – lũ lụt, xói mòn...) hay con người (khai thác khoáng sản, nước ngầm, tăng tải trọng...) sẽ gây ra hoặc cường hóa tai biến sụt lún.

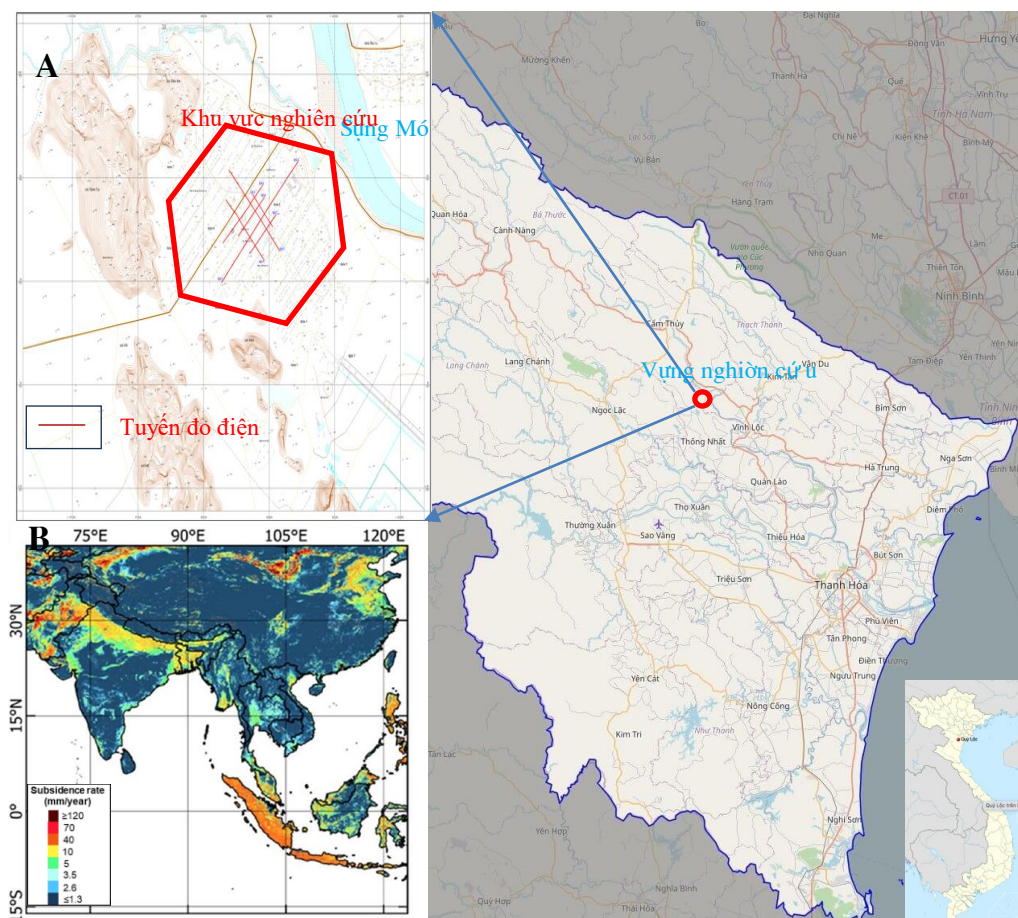
Theo thống kê, trên thế giới có khoảng 6,3 triệu km^2 (chiếm 5% tổng diện tích đất toàn cầu) có tốc độ sụt lún $5mm/năm$ trong đó có 231.000 km^2 xuất hiện ở khu vực thành thị với mật độ dân số cao và ảnh hưởng tới gần 2 tỷ người (25% dân số toàn cầu) [17]. Tsimur Davydenko và đồng nghiệp trong nghiên cứu của mình đã chỉ ra rằng sụt lún xảy ra nhiều nhất ở các khu vực đông dân cư chủ yếu do sự khai thác nước ngầm quá mức dẫn đến giảm sức căng bề mặt của lớp nước bên dưới và sự nén chặt của lớp trầm tích hay nói cách khác là tốc độ sụt lún và quá trình khai thác nước ngầm có sự tương quan chặt chẽ với nhau.

Ở Hoa Kỳ, theo thống kê năm 2018 thì sụt lún xảy ra ở 45 tiểu bang và 80% các vụ sụt lún có nguyên nhân từ việc khai thác nước ngầm chủ yếu tại các vùng địa chất đá vôi, thạch cao hoặc muối mỏ. Tại Việt Nam trong những năm gần đây tai biến sụt lún đất gia tăng cả về số lượng và hậu quả tác động. Sụt lún xảy ra tại các vùng có nền địa chất

yếu và khai thác nước ngầm quá mức như tại các thành phố lớn của đồng bằng sông Cửu Long [16], đồng bằng sông Hồng và cả các tỉnh miền núi. Tuy nhiên số lượng và tác động mạnh nhất do sụt lún gây ra chủ yếu xảy ra ở các khu vực nằm trên nền địa hình đá vôi như tại Thanh Hóa, Hòa Bình, Sơn La, Hà Giang, Cao Bằng, Lạng Sơn, Nghệ An... Chu trình nước ngầm trong đá vôi sẽ hòa tan CaCO_3 và tạo nên các hang ngầm được gọi là quá trình karst [18]. Nước ngầm giống như những cây chống trần hang khi mực nước cao và khi mực nước ngầm suy giảm thì các trần hang không được nâng đỡ và trở nên yếu nên dễ dàng bị sập và gây nên sụt lún. Khu vực kaster luôn tồn tại hệ thống hang ngầm, tuy nhiên mật độ và kích thước các hang phụ thuộc vào dạng địa hình, thành phần vật chất của đá vôi và điều kiện khí hậu thủy văn cũng như yếu tố tác động của hoạt động nhân sinh. Việc xác định được cấu trúc địa chất, sự phân bố và kích thước các hang ngầm trong vùng núi đá vôi có ý nghĩa quan trọng trong công tác dự báo tai biến giúp người dân giảm thiểu các thiệt hại về người và

của cũng như giúp các nhà quản lý đề xuất các phương án quy hoạch hợp lý.

Khu vực nghiên cứu thường xuyên xảy ra hiện tượng sụt lún và đặc biệt nghiêm trọng vào các năm 2014 và 2019 với hàng loạt các hố sụt xảy ra trong khu dân cư đông đúc của thị trấn với các hố sụt kích thước rộng từ vài mét đến hơn chục mét và sâu tới 6,5m [5, 6] đã gây ra thiệt hại về tài sản và hoang mang dư luận. Do khu vực nằm trên nền địa hình karst cộng thêm với nhu cầu khai thác nước ngầm tăng do áp lực dân số tăng được coi là nguyên nhân chủ yếu dẫn đến sự gia tăng tai biến sụt lún đất xảy ra trong khu vực. Hình 01B cho thấy khu vực nghiên cứu nằm trong vùng sụt lún với tốc độ trung bình khoảng 5mm/năm [17]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương pháp thăm dò địa vật lý điện để (1) xác định các tầng địa chất; (2) vị trí và kích thước các hang ngầm tại khu vực nghiên cứu, từ đó làm cơ sở khoa học giúp các nhà quản lý hoạch định các chính sách quản lý, quy hoạch hợp lý giúp giảm thiểu thiệt hại về người và của cho người dân trong tương lai.



Hình 1. Vị trí khu vực nghiên cứu và sơ đồ tuyến địa vật lý (A); Tốc độ sụt lún của Việt Nam so với các nước trên thế giới (B)

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1 Đối tượng nghiên cứu

Khu vực được lựa chọn nghiên cứu thuộc huyện Yên Định, tỉnh Thanh Hóa (hình 1). Với đặc điểm khí hậu, thổ nhưỡng tốt nên khu vực nghiên cứu có kinh tế phát triển và mật độ dân cư đông đúc, kéo theo nhu cầu nước sinh hoạt và phục vụ sản xuất cũng tăng, trong khi đó người dân chủ yếu khai nước ngầm để sinh hoạt và sản xuất không có kiểm soát nên nguồn tài nguyên này ngày càng suy giảm về chất và lượng cũng như cường hóa tại biến sụt lún. Một nguyên nhân khác có thể kể đến là do hoạt động khai thác cát tại khúc sông Mã gần thị trấn dẫn đến lòng sông bị đào sâu, gây sạt lở bờ sông và hạ thấp gương nước ngầm cho khu vực.

Theo tài liệu địa chất, khu vực nghiên cứu nằm trong hệ tầng Đồng Giao (T_{2a} đg) và hệ tầng Cò Nòi (T_1 cn) là đá vôi xám, xám sẫm phân lớp bị dập vỡ mạnh mẽ [11]. Do thành phần không đồng nhất nên dễ dàng bị hòa tan và tạo nên hệ thống các hang động ngầm. Hệ thống các khe nứt, đứt gãy tại khu vực nghiên cứu đều có xu hướng bị căng kéo về hướng tây bắc nên các hang động hình thành và phát triển dọc theo các đới dập vỡ. Đây là cơ sở cho việc thiết kế các tuyến đo địa vật lý điện sao cho đi qua nhiều đới cấu trúc hay hang nhất có thể hay nói cách khác là các tuyến đo địa vật lý được thiết kế chủ yếu vuông góc với hệ thống khe nứt, đứt gãy. Ngoài ra, khu vực nghiên cứu đã xảy ra các hố sụt với kích thước lớn nên để xác định phạm vi ảnh hưởng và hệ thống hang động liên quan đến các hố sụt này, các tuyến đo điện được thiết kế gần xung quanh và đi qua hố sụt. Có tất cả 07 tuyến được bố trí như hình 1 với khoảng cách giữa các điện cực (a) là 4m và 5m.

2.2 Phương pháp nghiên cứu

Có nhiều phương pháp để theo dõi và đánh giá, dự báo vùng có nguy cơ tại biến sụt lún. Cơ quan Khảo sát trắc địa quốc gia NOAA của Hoa Kỳ đã sử dụng một mạng lưới quốc gia gồm các máy thu GPS có độ chính xác cao để theo dõi sự thay đổi độ cao nhằm xác định độ lún bề mặt từ vệ tinh InSAR tại các trạm, được gọi là trạm tham chiếu hoạt động liên tục (CORS) [8]. Các phương pháp khác như mô hình hóa sụt lún đã được áp dụng bởi Mohammady và cộng sự, 2019 [13]; Rahmati và cộng sự, 2019 tại các khu vực của Iran [14], tại

UAE bởi Elmahdy và cộng sự, 2022 [3], tại Hy Lạp bởi Ilia và cộng sự, 2018 [9], tại Hàn Quốc bởi Bui và cộng sự, 2018 [2], tại Trung Quốc bởi Zhou và cộng sự, 2019 [19], tại Indonesia bởi Hakim và cộng sự, 2020 và tại Hoa Kỳ bởi Smith & Majumdar, 2020 [15] sử dụng các bản đồ dự đoán kết hợp mô tả khí hậu, địa hình, địa chất, tính chất đất và thủy văn khu vực nghiên cứu. Tuy nhiên các phương pháp này chỉ áp dụng để tính toán sụt lún chủ yếu trên nền trầm tích, diện tích quan sát rộng. Đối với khu vực hẹp, xác định đối tượng cụ thể như kích thước các hang ngầm karster và cấu trúc nền địa chất từ đó dự báo nguy cơ sụt lún thì phương pháp đo địa vật lý điện là ưu việt hơn cả và được áp dụng trong nghiên cứu này.

➤ Phương pháp đo ảnh điện đa cực

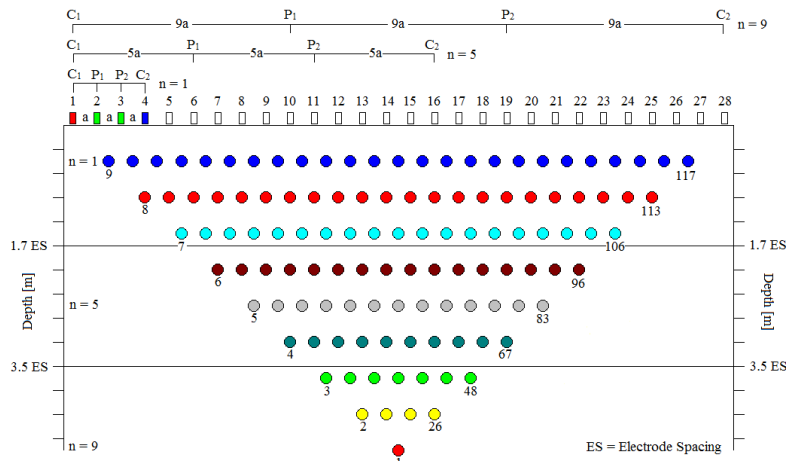
Cho đến nay, các phương pháp đo sâu (nghiên cứu sự thay đổi điện trở suất theo phương thẳng đứng) và mặt cắt điện (nghiên cứu sự thay đổi điện trở suất theo phương nằm ngang) với 4 cực vẫn thường được sử dụng rộng rãi để giải quyết các bài toán địa chất một chiều (1D). Tuy nhiên trong thực tế cần giải quyết các bài toán địa chất hai chiều (2D) phức tạp, nghiên cứu được sự thay đổi điện trở suất của môi trường theo cả hai hướng thẳng đứng và nằm ngang, phương pháp ảnh điện ra đời là phương pháp kết hợp được cả phương pháp đo sâu và phương pháp mặt cắt điện và được sử dụng cho các khảo sát cần độ phân giải cao đặc biệt trong nghiên cứu tìm kiếm các hang động ngầm [4, 12]. Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng hệ thống thiết bị SUPERSTING R8/IP + 56 của hãng AGI - Mỹ để thực hiện khảo sát.

Nguyên lý của phương pháp này là nghiên cứu sự thay đổi tính chất dẫn điện của các loại đất đá theo phương thẳng đứng, ở các độ sâu khác nhau theo chiều từ trên xuống dưới. Mỗi loại đất đá có tính chất dẫn điện khác nhau, tính chất này được xác định qua giá trị điện trở suất (ký hiệu là ρ và có thứ nguyên là Ωm). Trong môi trường địa chất tự nhiên, các hang karst tồn tại dưới hai trạng thái: Hang khô (hang không khí) và hang bị lấp nhét (bởi các vật liệu bùn sét hoặc nước). Trường hợp hang ở trạng thái khô rỗng, điện trở suất đo được tại đây sẽ rất cao. Ngược lại, nếu hang ở trạng thái bị lấp nhét, điện trở suất đo được sẽ nhỏ hơn rất nhiều so với môi trường xung quanh. Chính sự khác biệt về giá trị điện trở suất đó làm cơ sở cho phương pháp thăm dò địa vật lý điện phát hiện các dị thường cục bộ liên quan đến các đới nứt nẻ, các vị trí hồng hốc

hoặc các hang karst,... có mặt trong môi trường địa chất.

Hình 2 là sơ đồ minh họa các điểm số liệu đo được bằng hệ cực Wenner với hệ thống 28 điện cực. Kết quả đo đạc được biểu diễn dưới dạng mặt cắt điện trở suất biểu kiến đo đạc: trục nằm ngang là khoảng cách các điện cực trên tuyến; trục thẳng đứng là độ sâu khảo sát tương ứng với cự ly giữa

các điện cực, độ dài tuyến và loại hệ cực được sử dụng. Số liệu sau khi đã thu thập (mặt cắt điện trở suất biểu kiến đo đạc) cùng với thông tin về bề mặt địa hình sẽ được đưa vào phần mềm xử lý 2D chuyên dụng để tính toán ra sự phân bố điện trở suất thực của môi trường cần nghiên cứu (mặt cắt địa điện) và cuối cùng là mặt cắt minh giải (mặt cắt địa chất - địa vật lý).



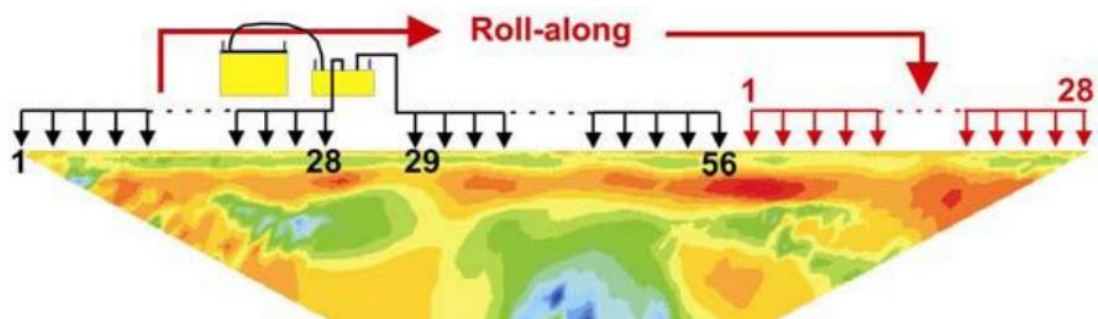
Hình 2. Sơ đồ bố trí các điện cực phương pháp ảnh điện và vị trí các điểm số liệu thu được trong mặt cắt điện trở suất biểu kiến đo đạc

➤ Công tác thu thập tài liệu thực địa

Trong khu vực khảo sát bố trí các tuyến đo địa vật lý theo các mặt cắt dọc và ngang. Trên mỗi tuyến đo bố trí các điểm đo sâu điện. Tại mỗi điểm đo, tiến hành đo bằng máy giá trị cường độ dòng điện (I) qua lưỡng cực phát AB và hiệu điện thế (ΔU) giữa lưỡng cực thu MN, sau đó dịch chuyển tăng kích thước hệ cực với khoảng cách đều là $AB = MN = a$. Các hang ở độ sâu không lớn và không chứa nước mới có khả năng gây sụt lún còn lại các

hang ở độ sâu lớn thường mức độ gây sụt không cao. Do vậy, độ sâu nghiên cứu được thiết kế để tìm kiếm các hang ở độ sâu khoảng 50m đổ lại với độ mở của cực được lựa chọn là 5m.

Các tuyến khảo sát được lấy chi tiết tọa độ tại mỗi cực cắm là cơ sở để luận giải xác định chính xác vị trí dị thường điện trở suất (hang ngầm). Số liệu đo được lưu trữ tự động trong bộ nhớ của máy và được trút ra máy tính ngay ngoài thực địa để tiến hành các bước xử lý kết quả tiếp theo.



Hình 3. Sơ đồ đo "cuốn chiếu" của thiết bị SuperSting R8/IP+56 ngoài thực địa

➤ Công tác xử lý số liệu

Tài liệu thu được trên mỗi tuyến đo là một mảng số liệu, bao gồm tập hợp giá trị điện trở suất

biểu kiến của các điểm đo, ở các độ sâu khác nhau trên tuyến qua quá trình xử lý phân tích mà các thông số như: Điện trở suất thực, bề dày các lớp

đất đá được xác định.

Quá trình xử lý thực hiện trên cơ sở xây dựng lát cắt đẳng trị điện trở suất. Trên mỗi tuyến đo trực hoành là vị trí điểm đo, trực tung là chiều sâu khảo sát. Giá trị điện trở suất ghi trên lát cắt đã được cộng tương hỗ để khử dị thường ảo và đưa về vị trí thẳng đứng tương ứng với vị trí thực của đối tượng theo công thức:

$$\rho_z(Z_n) = \frac{1}{2} [\rho_{ki}(Z_n) + \rho_{ki-n}(Z_n)]$$

Ở đây: i là vị trí điểm đo sâu trên tuyến đo.

n là thứ tự dịch chuyển cự ly đo sâu tại điểm đo.

$$Z_n = \frac{(n+1) \cdot a}{2} \quad \text{là chiều sâu khảo sát.}$$

Quá trình xử lý được phân tích định lượng theo mô hình hai chiều (2D) [1, 10]. Mục đích là xác định các tham số của các phần tử trên toàn bộ mặt cắt sao cho trường quan sát trên mặt cắt trùng với trường tính toán một cách tốt nhất, thực chất là cực tiểu hóa phiếm hàm độ lệch bình phương trung bình giữa giá trị điện trở suất đo trên toàn bộ tuyến đo với giá trị tính mô hình lý thuyết.

Toàn bộ quá trình được thực hiện bằng các phần mềm xử lý chuyên dụng Res2Dinvi sẽ cho ra hình ảnh lát cắt điện trở suất (ảnh điện) [4]. Trên đó thể hiện độ sâu cũng như điện trở suất của các đối tượng nằm bên dưới. Từ đó cho phép thành lập mặt cắt địa vật lý và luận giải, nhận dạng các đối tượng.

Chất lượng số liệu đo đạc được đánh giá qua sai số của phép đo. Sai số này là sự chênh lệch giữa các lần đo của cùng một phép đo. Từ số liệu đo đạc (mặt cắt điện trở suất biểu kiến đo đạc), dựa vào loại hệ cực đo và hệ số thiết bị, chương trình sẽ tính ra điện trở suất tính toán (mặt cắt điện trở suất biểu kiến tính toán). Từ số liệu tính toán, số liệu địa hình và độ sâu khảo sát của từng loại hệ cực đo, chương trình sẽ tạo ra một mô hình ban đầu bằng cách phân chia môi trường thành các khối chữ nhật mà vị trí, kích thước của chúng dựa trên vị trí các điểm số liệu đo đạc và cự ly giữa chúng. Sau một số vòng lặp so sánh và điều chỉnh (nghịch đảo) lại mô hình ban đầu, chương trình sẽ chọn ra mô hình mà giả mặt cắt điện trở suất do chúng tạo ra (tính toán) trùng với số liệu đo đạc thực tế nhất

(mặt cắt nghịch đảo).

Từ mặt cắt địa điện, cùng với kiến thức về địa chất chúng tôi xử lý và thu được mặt cắt địa chất các tuyến khảo sát. Chất lượng của quá trình xử lý này được đánh giá qua hai loại sai số: sai số RMS và chuẩn L2 (xem trên từng mặt cắt). Hai loại sai số này dưới 10% là hoàn toàn đáng tin cậy để minh giải và cả 07 mặt cắt thu được đều thỏa mãn yêu cầu trên. Để tiện cho việc đối sánh và phân tích các tuyến, số liệu đều được xử lý theo cùng một lưu đồ, với cùng bộ tham số và được hiển thị với cùng thang màu điện trở suất. Kết quả được trình bày dưới đây.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1 Phân chia cấu trúc nền

Dựa vào giá trị thu được trên các mặt cắt nghịch đảo, chúng tôi đưa về cùng một thang điện trở suất (ρ) nằm trong khoảng từ $13 \div 750 \Omega m$. Giá trị này là phong chung đại diện cho điện trở suất của các mặt cắt khu vực nghiên cứu và là cơ sở để nhận diện các đối tượng có cùng một giá trị điện trở suất. Từ kết quả thu được 07 mặt cắt địa điện có thể phân chia nền địa chất khu vực nghiên cứu thành các lớp đất đá chính như sau:

(I) Lớp trên cùng là lớp vật liệu bờ rời điện trở suất thấp, ρ nằm trong khoảng $5 \div 39 \Omega m$. Lớp phủ này liên quan đến trầm tích Đệ tứ, có bề dày thay đổi theo từng tuyến và trung bình dày 5-7m. Ngoài ra tại một số tuyến vật liệu trầm tích còn lấp nhét vào các hang karst mở nên bề dày lớp này khá lớn lên đến trên 20m như ở các tuyến QL2, QL3.

(II) Lớp đá phong hóa mạnh. Có giá trị điện trở suất từ $39 \div 150 \Omega m$ với độ dày từ rất mỏng đến hàng chục mét. Đới này nằm ở ranh giới giữa lớp phủ trầm tích và đá gốc. Do bị phong hóa gần như hoàn toàn nên khá giống với trầm tích. Tuy nhiên do vẫn giữ được cấu tạo khối của đá mẹ (vôi) và chứa nhiều sét nên khả năng hút nước là thấp hơn lớp trầm tích bên trên, khả năng dẫn điện thấp hơn hay có điện trở suất cao hơn.

(III) Lớp đá phong hóa vừa, ít phong hóa. Có giá trị điện trở suất từ $150 \div 214 \Omega m$. Đây là lớp bán phong hóa và vẫn còn lẫn đá mẹ chưa phong hóa hết nên khá cứng và dẫn điện kém. Lớp này bị dập vỡ mạnh mẽ nên khi có hoạt động nước ngầm thì dễ dàng tạo nên các hang karst.

Khu vực khảo sát khá bằng phẳng nên mức độ phong hóa mạnh (lớp II) và vừa (lớp III) ở các mặt

cát là tương đối đồng nhất, nằm dưới lớp phủ trầm tích đệ tứ và có mặt hầu như trên toàn bộ của các tuyến đo.

(IV) Lớp đá gốc (vôi). Có giá trị điện trở suất lớn hơn $214 \Omega\text{m}$.

Để kiểm chứng kết quả luận giải, nhóm tác giả đã đi khảo sát tại các hộ dân khoan giếng quanh khu vực khảo sát và dọc các tuyến đo địa vật lý. Kết quả ghi nhận cho thấy có 04 lượt (lớp) đất đá người dân đào qua trong quá trình khoan giếng gồm: Lượt lớp (I) là lớp đất bờ rời; lớp (II) là lớp đá sệt, đá non (đá son) có màu xám đến nâu đỏ; lớp (III) là lớp đá cứng có kẽ, người dân thường khoan giếng đến tầng này thì gặp nước; lớp (IV) là lớp đá xanh (đá vôi) cứng nguyên khối, khoan lên lấy được các thỏi đá. Các kết quả khoan này trùng với luận giải của địa vật lý.

3.2 Kết quả nhận dạng các dị thường hang

Từ kết quả thể hiện trên mặt cắt địa điện của 07 tuyến đo (hình 1), nhóm tác giả đã xác định được các vị trí có các dị thường điện trở suất chỉ thị cho các hang karster cụ thể bao gồm:

➤ Tuyến QL1

Tuyến chạy theo hướng tây bắc đông nam và chạy dọc theo đường liên thôn 6 và 7 (hình 1). Tuyến có chiều dài là 555m với khoảng cách điện cực là 5m và đạt độ sâu tối đa là 53m. Trên mặt cắt địa điện (hình 4) có thể nhận dạng được 04 đới dị thường có giá trị điện trở suất thấp ($\rho < 39 \Omega\text{m}$). Các dị thường này đều nằm trong lớp đá vôi phong hóa nứt nẻ mạnh (lớp III), hình thành nên các hang karst. Trên toàn bộ mặt cắt, đá gốc không dẫn điện nên điện trở suất rất lớn và được thể hiện bằng màu đỏ trên thang màu. Các đới cấu trúc phong

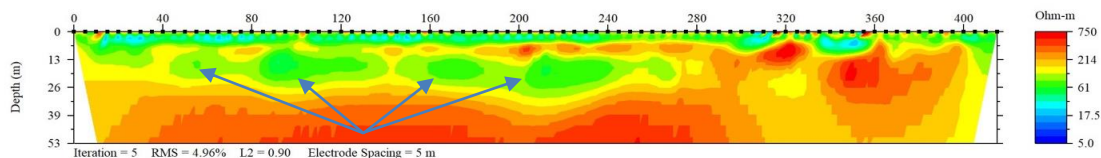
hóa hoặc chứa vật liệu bờ rời chứa nước thì giá trị điện trở suất giảm dần, xuống rất thấp và được thể hiện bằng màu xanh nước biển. Các dị thường chính (mũi tên màu đen trên hình 4) bao gồm:

+ (1) Dị thường thứ nhất xuất hiện trong khoảng mét thứ 55 (hình 4) với điện trở suất $\rho < 30 \Omega\text{m}$. Dị thường này có kích thước khoảng $1.5 \times 1.5\text{m}$ và ở độ sâu 13m. Đây là đới cấu trúc bị phong hóa mạnh từ trong ra ngoài và có dạng hình tròn hoặc tồn tại một hang ngầm bị lấp nhét bởi vật liệu bờ rời chứa nước. Theo thời gian, vị trí có khả năng sụt lún;

+ (2) Dị thường thứ hai xuất hiện trong khoảng mét thứ 85÷130, tức từ cực thứ 18 đến 27 (hình 4) với điện trở suất $\rho < 39 \Omega\text{m}$. Vị trí cấu trúc này có thể liên quan đến cấu trúc phong hóa mạnh mẽ hoặc dạng của 1 hang kích thước $15 \times 45\text{m}$ bị lấp nhét bởi vật liệu bờ rời và có nguy cơ sụt lún cao;

+ (3) Dị thường thứ 3 từ mét thứ 160 ÷ 180. Vị trí này, đá gốc bị phong hóa mạnh nằm xen kẹp bên trên và bên dưới là lớp đá gốc chưa bị phong hóa hoặc có thể là hang ngầm chứa các vật liệu bờ rời chứa nước. Khi có tác động làm mất khả năng chống đỡ của tầng phía trên như hoạt động kiến tạo, nước ngầm, nhân sinh sẽ gây ra tai biến sụt lún;

+ (4) Dị thường thứ 4 từ mét 205 – 240 trên mặt cắt địa điện cho thấy dị thường này giống với các dị thường trên, tuy nhiên đới đá gốc trần phía trên còn khá dày. Theo thời gian, các đới dị thường này có thể liên thông với nhau tạo thành một đới xung yếu ở phía dưới, là cơ sở để hình thành hệ thống hang ngầm cũng như gây ra tai biến sụt lún lớn cho khu vực.



Hình 4. Mặt cắt địa điện tuyến QL1

➤ Tuyến QL2

Tuyến QL2 đo dọc đường 10, chạy theo hướng tây bắc đông nam, bắt đầu từ ngã tư đường 1 thôn 3 và chạy qua vị trí đã từng xảy ra sụt lún năm 2016. Tuyến được thực hiện với 161 điện cực x 5m dài 790m, đạt độ sâu tối đa là 53m. Số liệu đo, sau

khi xử lý thu được mặt cắt địa điện các tuyến QL2 (hình 5), trong đó thể hiện sự có mặt của dị thường chính cụ thể như sau:

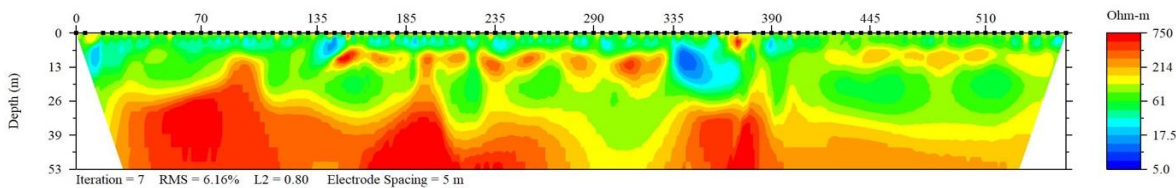
+ (1) Các đới dị thường liên quan đến đới cấu trúc bị phong hóa mạnh mẽ, xung quanh và đặc biệt là lớp trên cùng là lớp đá gốc chưa bị phong hóa hoặc phong hóa yếu. Vì vậy đây là cấu trúc dễ

tạo hang ngầm và trong tương lai có thể gây ra sụt lún. Liên quan đến các dị thường này nằm ở vị trí từ mét thứ: 140 – 170; 250 – 270; 300 – 305; 420 – 480 và 490 – 530m;

+ (2) Các dị thường liên quan đến đới cấu trúc bị phong hóa mạnh mẽ và có thể đã xảy ra sụt lún. Cấu trúc này có dạng hàm ếch và bị lấp nhét bởi các vật liệu bên trên. Liên quan đến dị thường này bao gồm các vị trí từ mét thứ 40 – 80; 105 – 140;

185; 220; 330 – 370; và mét thứ 390. Các hang mở với cấu trúc dạng hàm ếch đạt độ sâu đến gần 30m có nguy cơ sụt lún cao.

+ (3) Đặc biệt dị thường ở mét thứ 145m và 340m (gần vị trí xảy ra sụt lún trước đây) ghi nhận đới có điện trở suất rất thấp với kích thước 12 x 15m. Đây chính là hang ngầm chứa nước, chảy qua vị trí từng ghi nhận sụt lún.



Hình 5. Mặt cắt địa điện tuyến QL2

➤ Tuyến QL3

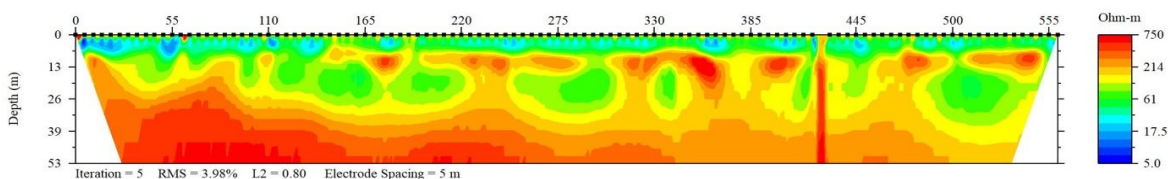
Tuyến QL3 chạy vuông góc với đường 10 và tuyến QL2 theo hướng đông bắc tây nam; bắt đầu từ phía núi Mầu chạy qua vị trí hố sụt từng ghi nhận năm 2016 và kết thúc phía đền thờ bà chúa Đồn Trang. Tuyến dài 1.375m với 280 điện cực khoảng cách 5m. Trên mặt cắt địa điện (hình 6) xác định được các đới dị thường có đặc điểm như sau:

+ (1) Các đới dị thường liên quan đến đới cấu trúc bị phong hóa mạnh mẽ (lớp II). Đới dị thường này được bao bọc xung quanh và đặc biệt là lớp trên cùng là lớp đá gốc chưa bị phong hóa hoặc phong hóa yếu. Vì vậy đây là cấu trúc dễ tạo hang

ngầm và trong tương lai có thể gây ra sụt lún. Liên quan đến các dị thường này nằm ở vị trí từ mét thứ: 140 – 170; 335 – 340;

+ (2) Đới cấu trúc bị phong hóa mạnh (lớp II), và bên trên là lớp đá bị phong hóa vừa xảy ra ở mét thứ 195 – 215; 275 – 305; và 535 – 550 m. Lớp này có khả năng gây ra sụt lún cao;

+ (3) Đới dị thường liên quan đến các hang dạng hàm ếch đã bị lấp nhét bởi các vật liệu trầm tích từ bên trên xảy ra ở các vị trí từ mét thứ 95 – 100; 120 – 135; 420; và mét thứ 445. Các vị trí này có khả năng lún cao.



Hình 6. Mặt cắt địa điện tuyến QL3

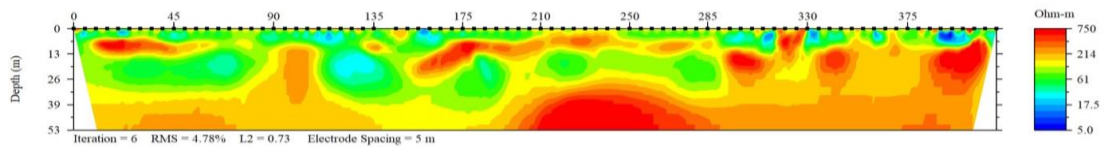
➤ Tuyến QL4

Tuyến chạy song song với tuyến QL3 cắt qua hố sụt nhà dân năm 2019, sân vận động và nhà văn hóa thị trấn. Tuyến có chiều dài là 550m với 112 điện cực và khoảng cách điện cực là 5m. Số liệu sau khi xử lý trên mặt cắt địa điện hình 7 cho thấy có 05 dị thường gồm:

+ (1) Các dị thường liên quan đến lớp đá vôi bị phong hóa mạnh mẽ và được bao bọc xung quanh và đặc biệt là lớp trên cùng là lớp đá gốc chưa bị phong hóa hoặc phong hóa yếu. Vị trí các dị thường theo độ dài tuyến là từ mét thứ 15 – 80; 170 – 190;

210 – 285. Trong đó tại các vị trí 65 và 180 dị thường chỉ thị cho sự xuất hiện của nước hay chứng tỏ đây là các hang karst ngầm với kích thước lần lượt là khoảng 10 x 10m và 2,5 x 10m. Vị trí khoảng mét 60 – 80 có khả năng sụt lún karst cao.

+ (2) Dị thường nằm tại mét thứ 110- 135m trên mặt cắt ghi nhận hang karst có chứa nước được bao bọc xung quanh bởi lớp đá phong hóa mạnh (lớp II). Hang karst có kích thước lớn 15 x 12m có nguy cơ gây ra sụt lún ở mức cao.



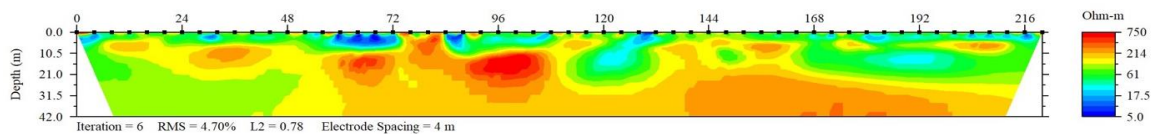
Hình 7. Mặt cắt địa điện tuyến QL4

➤ Tuyến QL5

Tuyến chạy song song với tuyến QL2, bắt đầu từ ngõ 4 thôn 2 và kết thúc tại ngõ 6 thôn 3. Để xác định hướng của hang ngầm gây ra sụt lún tại tuyến QL3, tuyến QL5 được thiết kế tạo thành hình vuông khép kín với các tuyến QL2, QL3 và QL6. Do đi qua khu vực dân cư nên chiều dài tuyến ngắn, do đó phải kéo ngắn khoảng cách các điện cực là 4m và độ sâu giảm còn 42m và chiều dài tuyến là 220m với 56 điện cực. Kết quả trên mặt cắt địa điện hình 8 cho thấy có 03 dị thường gồm:

+ (1) Dị thường nằm từ mét thứ 148 là đá vôi bị phong hóa mạnh được bao bọc xung quanh bởi đá gốc ít phong hóa, kích thước khoảng 5 x 8m;

+ (2) Dị thường nằm tại mét thứ 112- 136m trên mặt cắt ghi nhận hang karst dạng hàm ếch và có chứa nước đến độ sâu trên 20m. Dị thường từ mét thứ 168 đến cuối tuyến cũng ghi nhận hang karst có chứa nước với kích thước 12 x 4m nhưng được bao bọc xung quanh bởi lớp đá phong hóa mạnh và có khả năng gây ra sụt lún cao.

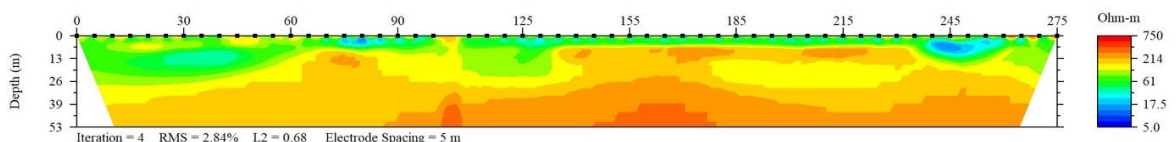


Hình 8. Mặt cắt địa điện tuyến QL5

➤ Tuyến QL6

Tuyến chạy song song và giữa tuyến QL3 với QL4. Tuyến có chiều dài là 275m với 56 điện cực 5m. Kết quả trên mặt cắt địa điện Hình 9 ghi nhận 01 vị trí dị thường là từ mét thứ 25 – 40.

Đây là đới phong hóa mạnh có khả năng là hang karst bị lấp nhét bởi các vật liệu từ trên xuống và chứa nước. Kích thước của đới này khá rộng, khoảng 15 x 4m và có khả năng gây nên sụt lún cao.



Hình 9. Mặt cắt địa điện tuyến QL6

➤ Tuyến QL 7

Tuyến chạy song song và nằm về phía nam của tuyến QL3 với chiều dài tuyến là 275m với 56 điện cực và khoảng cách điện cực 5m. Tuyến đo không xác định được các dị thường chỉ thị cho hang karst hoặc các khu vực sụt lún tiềm năng.

ít sạn sỏi có điện trở suất thấp ($\rho = 5 \div 39 \Omega m$). Bề dày của lớp này thay đổi theo từng vị trí nhưng khá dày có nơi đến trên 15m và lấp nhét vào các hang karst phía dưới;

- Đá vôi phong hóa nứt nẻ mạnh (lớp II) và vừa (lớp III): Các lớp này nằm dưới lớp phủ và khá mỏng. Giá trị điện trở suất của hai lớp này tương đối thấp và lần lượt có giá trị là $\rho = 40 \div 150 \Omega m$ và $\rho = 151 \div 214 \Omega m$;

- Đới đá tươi (lớp IV): Đá vôi không bị phong hóa, không dẫn điện và giá trị điện trở suất lớn hơn 214 Ohm.m nằm sâu phía dưới tuy nhiên đôi khi cũng lộ ra trên bề mặt như tại tuyến QL3, QL4 và QL5.

Xác định các hang động karst trong khu vực:

- Các hang karst tại khu vực nghiên cứu được nhận diện bởi các dị thường điện trở suất thấp

4. Kết luận

Trên cơ sở luận giải mặt cắt địa điện từ công tác đo ảnh điện tại khu vực nghiên cứu tỉnh Thanh Hóa có thể rút ra một số kết luận sau:

Về phân cấu trúc địa chất: có thể phân chia địa tầng khu vực nghiên cứu làm 4 lớp tương ứng với các giá trị điện trở suất khác nhau gồm:

- Lớp đất phủ (lớp I) là lớp trầm tích đệ tứ có diện phân bố ở phần trên mặt tại tất cả các vị trí trên các tuyến đo, với thành phần chủ yếu là sét lẫn

(trung bình khoảng vài chục Ω m);

- Các dị thường (hang karst) xuất hiện tại sáu trên bảy tuyến đo cho thấy tại khu vực nghiên cứu khá dày đặc các hang ngầm và có kích thước tương đối lớn từ vài mét đến hàng chục mét như tại tuyến QL3;

- Có 03 kiểu hang karst gồm: 1) các hang hở dạng hàm ếch bị lấp nhét bởi vật liệu trầm tích ở bên trên và chứa nhiều nước với độ sâu trung bình từ 7 ÷ 15m; 2) các hang kín không chứa nước được bao quanh bởi đá gốc bị phong hóa mạnh và có khả năng gây ra sụt lún; 3) các hang kín chứa nước hoặc vật liệu bờ rời ngậm nhiều nước (tuyến QL4), có khả năng sụt lún cao.

Kết quả trên chỉ mới phát hiện các hang karst có mặt tại các vị trí mà các tuyến đo đã cắt qua. Mặc dù khoảng cách giữa các tuyến và điểm đo đã được thiết kế sao cho phát hiện được hướng dòng chảy của các hang lớn liên quan đến hố sụt đã từng được ghi nhận, tuy nhiên khối lượng công việc vẫn còn khiêm tốn so với mức độ phức tạp của sự phát triển karst dưới mặt đất của khu vực nên không dự báo được hướng của dòng chảy ngầm. Vì vậy, cần bổ sung thêm khối lượng địa vật lý điện cũng như các phương pháp khác như thả chất chỉ thị và phương pháp khoan cho khu vực nghiên cứu.

Khu vực nghiên cứu có mức độ phát triển phức tạp của các hang karst do nằm trên nền đá vôi bị dập vỡ, thành phần không đồng nhất cộng thêm với việc khai thác nước ngầm quá mức nên hiện tượng sụt lún là không tránh khỏi. Vì vậy, cần thiết phải có các nghiên cứu chi tiết và rộng hơn để có cơ sở khoa học phục vụ khoanh định, cảnh báo các dạng tai biến địa chất – môi trường liên quan cũng như hoạch định các chính sách quy hoạch gắn với phát triển bền vững của địa phương.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Advanced Geosciences, Inc., (2009). Instruction Manual of AGI EarthImager 2D, p139.
[2] Bui, D. T., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Pradhan, B., Chen, W., et al. (2018). *Land subsidence susceptibility mapping in South Korea using machine learning algorithms*. Sensors, 18(8), 2464.
[3] Elmahdy, S. I., Mohamed, M. M., Ali, T. A., Abdalla, J. E. D., & Abouleish, M. (2022). *Land subsidence and sinkholes susceptibility mapping and analysis using random forest and frequency ratio models in Al Ain, UAE*. Geocarto International, 37(1), 315–331.
[4] Geotomo Software (2007) RES2DINV. *Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares methods*. User's manual, p138.

[5] <https://nhandan.vn/lai-phat-sinh-ho-sut-tai-xa-quy-loc-thanh-hoa-post345794.html>
[6] <https://nld.com.vn/thoi-su-trong-nuoc/xuat-hien-ho-tu-than-sau-ca-chuc-met-o-thanh-hoa-20141028151441025.htm>
[7] <https://oceanservice.noaa.gov/facts/subsidence.html>
[8] <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/land-subsidence#publications>
[9] Ili, I., Loupasakis, C., & Tsangaratos, P. (2018). *Land subsidence phenomena investigated by spatiotemporal analysis of groundwater resources, remote sensing techniques, and random forest method: The case of Western Thessaly, Greece*. Environmental Monitoring and Assessment, 190(11), 623.
[10] Jackson, Julia A., ed. (1997). "Karst". *Glossary of geology (Fourth ed.)*. Alexandria, Virginia: American Geological Institute. ISBN 0922152349.
[11] Lê Duy Bách, Đặng Trần Quân (2001). *Địa chất khoáng sản tỷ lệ 1: 50.000 nhóm tờ Thanh Hóa (E-48-IV)*. Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam.
[12] Loke M.H., (2004). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys*, p61. https://sites.ualberta.ca/~unswo/rth/UA-classes/223/loke_course_notes.pdf.
[13] Mohammady, M., Pourghasemi, H. R., & Amiri, M. (2019). *Land subsidence susceptibility assessment using random forest machine learning algorithm*. Environmental Earth Sciences, 78(16), 503.
[14] Rahmati, O., Falah, F., Naghibi, S. A., Biggs, T., Soltani, M., Deo, R. C., et al. (2019). *Land subsidence modeling using tree-based machine learning algorithms*. Science of the Total Environment, 672, 239–252.
[15] Smith, R. G., & Majumdar, S. (2020). *Groundwater storage loss associated with land subsidence in western United States mapped using machine learning*. Water Resources Research, 56(7), e2019WR026621.
[16] Trần Văn Tỷ, Huỳnh Văn Hiệp. (2017). *Hiện trạng khai thác nước dưới đất và mối tương quan giữa hạ thấp cao độ mực nước và sụt lún đất: Nghiên cứu tại Trà Vinh và thành phố Cần Thơ*. Can Tho University Journal of Science Môi trường 2017:128.
[17] Tsimur Davydenka et al. (2014). *Unveiling the Global Extent of Land Subsidence: The Sinking Crisis*, Geophysical Research Letters. volume 51 Issue 4
[18] What is Karst? (PDF). *Environmental Science Institute*. The University of Texas at Austin. December 2020.
[19] Zhou, C., Gong, H., Chen, B., Li, X., Li, J., Wang, X., et al. (2019). *Quantifying the contribution of multiple factors to land subsidence in the Beijing Plain, China with machine learning technology*. Geomorphology, 335, 48–61.