

Bài báo khoa học

Ứng dụng TRIGRS và kết hợp TRIGRS với Scoops3D trong dự báo trượt lở đất do mưa

Đỗ Văn Vững¹, Nguyễn Đức Hà², Nguyễn Huy Dương³, Trần Thế Việt^{4*}

¹ Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi; Dovanvung.tl@gmail.com

² Cục Địa chất Việt Nam; nh14vn@gmail.com

³ Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản; nguyenhuyduong112358@gmail.com

⁴ Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi; trantheviet@tlu.edu.vn

*Tác giả liên hệ: trantheviet@tlu.edu.vn; Tel.: +84-986492582

Ban Biên tập nhận bài: 8/1/2024; Ngày phản biện xong: 5/2/2024; Ngày đăng bài: 25/5/2024

Tóm tắt: Nghiên cứu này giới thiệu phần mềm TRIGRS và Scoops3D trong dự báo trượt lở đất do mưa. Theo đó, TRIGRS ngoài dùng để dự báo trượt lở còn được dùng để tính phân bố mực nước ngầm trong tầng phủ theo thời gian. Scoops3D sau đó dùng phân bố mực nước ngầm tính được để đánh giá ổn định mái dốc theo không gian ba chiều. Phương pháp đề xuất được áp dụng để phân tích điểm trượt xảy ra vào khoảng 12:00 sáng ngày 07/08/2023 ở thung lũng Mường Hoa - thị trấn Sapa. Kết quả tính cho thấy tại thời điểm xảy ra trượt, cả TRIGRS và Scoops3D dù đã chỉ ra được vị trí thực tế xảy ra trượt nhưng đều dự báo quá so với vết trượt thực tế. TRIGRS dự báo quá về diện tích vùng bị trượt, trong khi Scoops3D dự báo quá về vùng an toàn. Sự trùng khớp giữa vết trượt thực tế với vùng nguy hiểm dự báo bởi Scoops3D tốt hơn với tỷ lệ trùng khớp là 42% so với tỷ lệ của TRIGRS là khoảng 34%. Sự sai lệch trong kết quả tính toán có thể liên quan tới các giả thiết về số liệu đầu vào và điều kiện ban đầu trước khi có mưa. Do đó, với những vùng có đủ dữ liệu tính, phương pháp đề xuất sẽ là một công cụ mạnh trong dự báo trượt lở đất do mưa.

Từ khóa: Trượt lở đất; TRIGRS; Scoops3D; Mực nước ngầm; Ổn định mái dốc.

1. Mở đầu

Trượt lở đất là một trong những hiểm họa tự nhiên gây ra những mối đe dọa đáng kể đến tính mạng con người, cơ sở hạ tầng và môi trường [1, 2]. Loại hình tai biến địa chất này là nguyên nhân của nhiều thương vong, thiệt hại tài sản và sự gián đoạn các hoạt động kinh tế-xã hội trong các khu vực bị ảnh hưởng. Việc dự báo chính xác và kịp thời sự xuất hiện của trượt lở đất đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu thiệt hại, giúp triển khai các biện pháp phòng ngừa hiệu quả, bảo đảm sự an toàn cho cuộc sống của người dân [3–5].

Trong những năm gần đây, đã có một sự gia tăng đáng kể việc áp dụng các công nghệ tiên tiến và phương pháp mới nhằm nâng cao khả năng dự báo trượt lở đất [1, 6–8]. Một trong số những cách tiếp cận này là kết hợp mô hình lưới vật lý với công nghệ ảnh vệ tinh [8–11]. Sự kết hợp này đã tạo ra một công cụ mạnh mẽ để cải thiện độ chính xác và tính hiệu quả của công tác dự báo trượt lở đất, đặc biệt là trong các bài toán mô phỏng trượt lở đất do mưa. Các mô hình lưới vật lý dựa trên việc chia khu vực nghiên cứu thành một lưới các ô vuông đặc trưng bởi độ phân giải của bản đồ, trong đó một số đặc tính cụ thể như đặc trưng về đất, điều kiện địa hình, thảm phủ, dữ liệu nước ngầm và mưa được gán cho từng ô lưới [8, 11, 12]. Qua việc phân tích tương tác giữa các biến số vừa nêu, mô hình có khả năng mô phỏng và đánh giá khả năng xảy ra trượt lở. Phương pháp này giúp đánh giá toàn diện hơn về phân bố không gian và biến động thời gian của nguy cơ trượt lở đất, từ đó nâng cao độ chính xác trong công tác dự báo trượt lở.

Công nghệ ảnh vệ tinh và viễn thám hiện nay đang đóng vai trò then chốt trong việc thu thập dữ liệu độ phân giải cao về hiện trạng bề mặt đất, chỉ số thảm thực vật và điều kiện mưa [10]. Qua các kỹ thuật này, nhiều thông tin có giá trị về đặc điểm địa hình và các yếu tố môi trường ảnh hưởng đến khả năng trượt lở có thể được thu thập. Bằng cách kết hợp dữ liệu ảnh vệ tinh với mô hình lưới vật lý, các nhà nghiên cứu có thể nâng cao độ chính xác trong dự báo và ghi nhận sự tương tác phức tạp giữa các yếu tố khác nhau có ảnh hưởng tới sự xuất hiện của trượt lở đất.

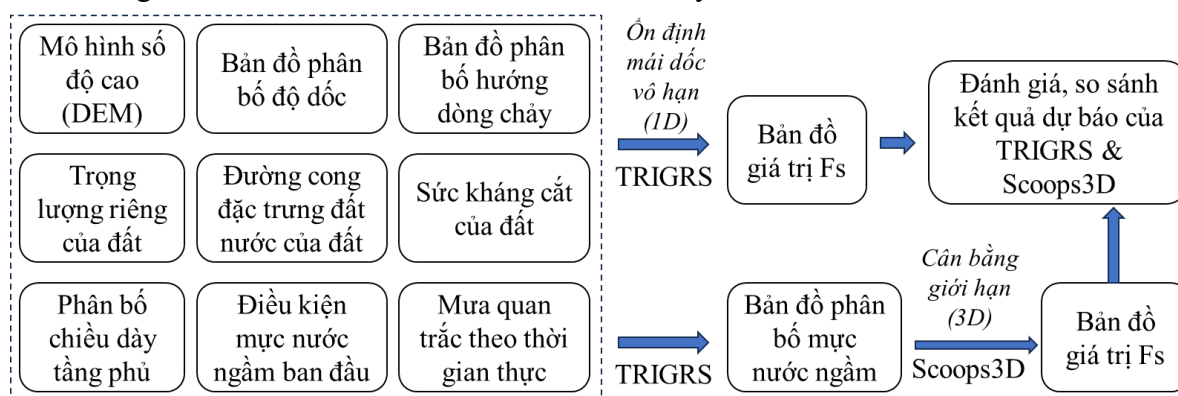
TRIGRS là phần mềm kết hợp mô hình thủy văn và địa kỹ thuật trong tính toán trượt lở mái dốc do mưa. Phần mềm này kết hợp tính dòng chảy ngầm do nước mưa với việc định tuyến dòng chảy tràn trên bề mặt và mô hình ổn định mái dốc vô hạn. Từ khi được công bố vào năm 2002, TRIGRS đã được dùng rộng rãi ở rất nhiều nước trên thế giới để giúp dự báo trượt lở đất do mưa theo thời gian thực như ở Mỹ, Trung Quốc, Italia, Hàn Quốc [2–4, 12]. Ở Việt Nam, nghiên cứu [2] đã áp dụng TRIGRS để mô phỏng trượt lở khu vực Lào Cai. Tuy nhiên, do thiếu phần kiểm chứng kết quả và diện tích vùng nghiên cứu quá rộng nên vẫn chưa thể đánh giá được khả năng hay sự phù hợp của TRIGRS khi dự báo trượt lở đất do mưa cho các khu vực miền núi phía Bắc ở Việt Nam nơi chịu ảnh hưởng sâu sắc của điều kiện khí hậu nhiệt đới.

Scoops3D được phát triển bởi Cục Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ, phần mềm dùng phương pháp cân bằng giới hạn (LEM) 3D và “phương pháp phân cột” để xác định mặt trượt tiềm năng [13]. Trong trường hợp này là giao tuyến giữa các mặt cầu với các cột đất được định nghĩa thông qua độ phân giải của mô hình số độ cao (DEM). Với mỗi mặt trượt tiềm năng, Scoops3D sẽ tính toán hệ số an toàn chống trượt theo mặt trượt tương ứng. Điểm tiến bộ của phần mềm là khả năng chỉ ra tất cả các khối trượt tiềm năng cho toàn bộ bề mặt địa hình đang xét. Ở Việt Nam, nghiên cứu [14] đã dùng Scoops3D để mô phỏng điểm trượt ở thung lũng Mường Hoa năm 2019. Tuy nhiên, tác giả đã dùng quá nhiều các giả thiết về điều kiện ban đầu và điều kiện biên để đơn giản hóa bài toán.

Nghiên cứu này ứng dụng và đánh giá khả năng áp dụng (có kiểm chứng) mô hình lưới vật lý trong việc tính toán dự báo trượt lở đất do mưa. Theo đó, phần mềm TRIGRS ngoài dùng để tính toán trượt lở đất còn được dùng để tính toán sự biến đổi của áp lực nước lỗ rỗng trong tầng phủ theo thời gian do mưa. Phần mềm Scoops3D sau đó sử dụng phân bố áp lực nước lỗ rỗng vừa tính được để đánh giá ổn định mái dốc theo không gian ba chiều dưới dạng bản đồ phân bố hệ số an toàn. Chất lượng của bản đồ phân bố hệ số an toàn trượt lở được đánh giá thông qua việc chồng khớp bản đồ dự báo lên bản đồ hiện trạng trượt lở ở khu vực nghiên cứu sử dụng chỉ số MSR (*Modified Success Rate*).

2. Phương pháp nghiên cứu và số liệu tính toán

Như đã đề cập, ngoài việc dùng TRIGRS để mô phỏng trượt lở đất, nghiên cứu còn kết hợp TRIGRS và Scoops3D để mô phỏng bài toán trượt lở đất do mưa trong không gian ba chiều dùng mô hình số độ cao trích xuất từ dữ liệu bay UAV. Hình 1 thể hiện sơ đồ cấu trúc



Hình 1. Cấu trúc nghiên cứu áp dụng TRIGRS và kết hợp TRIGRS với Scoops3D trong dự báo trượt lở đất.

ngghiên cứu khi áp dụng mô hình TRIGRS và kết hợp TRIGRS với Scoops3D trong dự báo trượt lở đất.

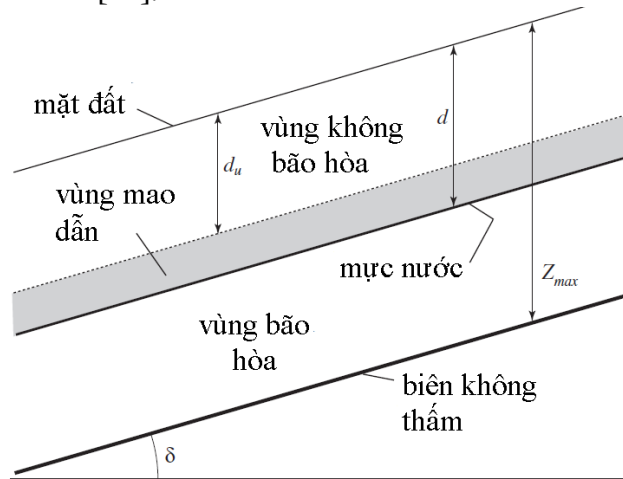
a) Cơ sở lý thuyết bài toán tính toán biến đổi áp lực nước lỗ rỗng trong mái dốc dùng TRIGRS

TRIGRS [8, 12] là mô hình mã nguồn mở, một chiều (1D) đã được áp dụng rộng rãi để dự đoán trượt nông do mưa gây ra [2, 4, 8, 12, 15]. TRIGRS kết hợp mô hình thủy văn với mô hình tính ổn định mái dốc vô hạn để phân tích bài toán trượt lở đất do mưa [12]. Phần mềm lần đầu được giới thiệu vào năm 2002 dựa vào phương pháp khuyến nghị bởi Iverson [16] với việc cho phép xét tới số liệu mưa theo thời gian thực. Trong phiên bản mới hơn (TRIGRS 2.0), nghiên cứu [12] đã cải tiến công thức 1D của Richard để tính toán sự ngấm nước vào mái dốc do mưa dùng hệ trục tọa độ chuyển đổi [16]. Lời giải giải tích của công thức [17] khuyến nghị để xác định lượng ngấm nước vào trong tầng phủ không bão hòa phía trên mực nước ngầm.

TRIGRS cho phép mô phỏng dòng thấm trong điều kiện bão hòa hoặc không bão hòa vào mái dốc với tầng đá không thấm ở độ sâu vô hạn hoặc hữu hạn. Căn cứ vào đặc điểm của khu vực nghiên cứu, mô hình tính thấm vào môi trường đất không bão hòa ở thời điểm ban đầu với tầng không thấm ở chiều sâu hữu hạn được chọn. Lựa chọn này coi mặt cắt ngang địa chất gồm 3 lớp với lớp dưới cùng là lớp đất bão hòa nằm dưới mực nước ngầm, tiếp đến là lớp đất bão hòa do mao dẫn, và trên cùng là lớp đất không bão hòa giới hạn bởi mặt đất tự nhiên (Hình 2). TRIGRS dùng mô hình thấm nước có xét ảnh hưởng của sự biến đổi cột nước áp ψ là hàm số của độ sâu Z và thời gian t theo mô hình thủy văn [16]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{1}{\cos^2 \delta} \frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

Trong đó θ là độ ẩm thể tích của đất; t là thời gian (s), z là độ sâu điểm tính (m), $K(\psi)$ là hàm thấm (m/s) theo phương đứng, δ là góc dốc, và ψ là áp lực nước lỗ rỗng (kPa). Lời giải của công thức trên và các diễn giải chi tiết hơn về mô hình TRIGRS được trình bày trong tài liệu diễn giải về mô hình [12].



Hình 2. Các điều kiện biên giả thiết trong bài toán tính thấm nước do mưa dùng TRIGRS.

Trong công thức (1), sự phụ thuộc của hệ số thấm $K(\psi)$ và độ ẩm thể tích θ vào cột nước áp trong công thức của Richard được mô tả bởi các mối liên hệ sau:

$$K(\psi) = K_s \exp(\alpha \psi^*) \quad (2)$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp(\alpha \psi^*) \quad (3)$$

Trong công thức (2) và (3), $\psi^* = \psi - \psi_o$, với ψ_o là hệ số như định nghĩa dưới đây, K_s là hệ số thấm bão hòa theo phương Z, θ_r là độ ẩm thể tích dư, và θ_s là độ ẩm thể tích bão hòa. Tham số α đặc trưng cho phân bố kích thước lỗ rỗng trong đất hay có thể hiểu đây là độ giảm hệ số thấm hoặc độ ẩm của đất khi $\psi < 0$. α được ước lượng bằng cách khớp công thức (3) vào đường cong đặc trưng đất nước. $\psi_o = -1/\alpha$, thể hiện chiều cao của cột nước mao dẫn phía trên mực nước ngầm. Để hiểu chi tiết về công thức (1) cũng như cách diễn giải cho công thức này, có thể tham khảo thêm trong hướng dẫn sử dụng bởi [12].

TRIGRS áp dụng phương pháp D8 để định tuyến dòng chảy từ ô lưới này sang các ô xung quanh. Mô hình tính lượng ngấm I vào mỗi ô lưới là tổng của lượng mưa P và lượng chảy bề mặt từ tất cả các ô xung quanh, R_u với giả thiết rằng lượng ngấm nước I vào một ô lưới không vượt quá hệ số thấm bão hòa K_s của ô đó. Dòng chảy mặt sẽ xuất hiện khi điều kiện này không đảm bảo. Trong cả hai trường hợp, lượng thấm nước được xác định theo:

$$I = P + R_u \text{ nếu } P + R_u \leq K_s \quad (4)$$

$$I = K_s, \text{ nếu } P + R_u > K_s \quad (5)$$

Ở mỗi ô lưới khi $P + R_u > K_s$, lượng nước vượt này sẽ được coi là dòng chảy mặt, R_d , và lập tức được chuyển sang các ô lưới liền kề xung quanh theo hướng dốc

$$R_d = P + R_u - K_s, \text{ nếu } P + R_u - K_s \geq 0 \quad (6)$$

$$R_d = 0, \text{ nếu } P + R_u - K_s < 0 \quad (7)$$

b) Đánh giá ổn định mái dốc dùng TRIGRS

Vùng nghiên cứu đặc trưng bởi mô hình số độ cao được chia thành các ô lưới. Mỗi ô đặc trưng cho một cột đất với kích thước là độ phân giải của bản đồ sử dụng và chiều dày là chiều dày của tầng phủ phía trên nền không thấm. Bỏ qua lực tương tác giữa các cột đất kề nhau, sự an toàn ổn định của một cột đất bất kỳ ở thời điểm xác định tại độ sâu Z được đặc trưng bởi hệ số an toàn F_s là tỷ số giữa sức kháng ma sát Coulomb và các thành phần ứng suất gây trượt do trọng lực [18]:

$$F_s(Z, t) = \frac{\tan \Phi'}{\tan \delta} + \frac{(c' + \Delta C) - \psi(z, t) \gamma_w \tan \Phi'}{\gamma_z Z \sin \delta \cos \delta} \quad (8)$$

Trong đó c' là lực dính hiệu quả của đất; ΔC là lực dính thực do sự hiện diện của rễ cây trong đất, Φ' là góc ma sát trong hiệu quả, ψ là cột nước áp là hàm số của độ sâu Z và thời gian t; δ là góc dốc; γ_w là trọng lượng riêng của nước, γ_s là trọng lượng riêng của đất.

c) Đánh giá ổn định mái dốc dùng Scoops3D

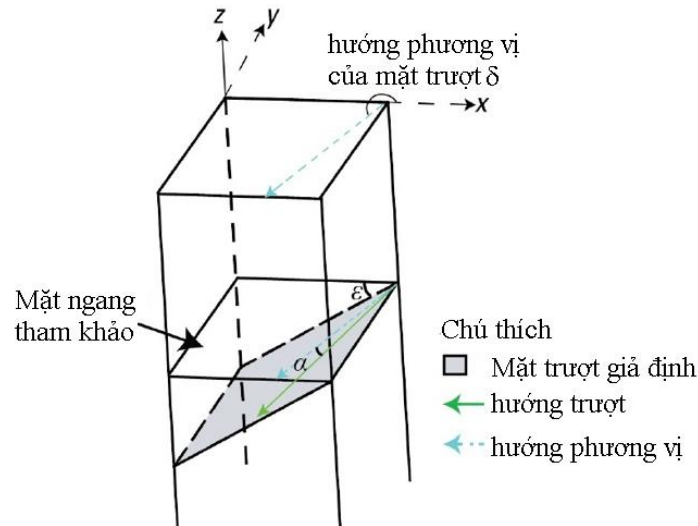
Scoops3D được phát triển bởi Cục Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ, phần mềm dùng phương pháp cân bằng giới hạn (LEM) 3D và “phương pháp phân cột” để xác định mặt trượt tiềm năng. Trong trường hợp này là các giao tuyến giữa các mặt cầu với các cột đất được định nghĩa thông qua độ phân giải của mô hình số độ cao (DEM). Với mỗi mặt trượt tiềm năng, Scoops3D sẽ tính toán hệ số an toàn chống trượt tương ứng. Điểm tiến bộ của phần mềm là có thể xét ảnh hưởng của bề mặt địa hình thông qua mô hình số độ cao và chỉ ra tất cả các khối trượt tiềm năng cho toàn bộ bề mặt địa hình đang xét.

Scoops3D giả thiết sự cân bằng lực và mô men xảy ra ở tất cả các cột đất cũng như với toàn bộ khối trượt. Phần mềm phân tích mặt phá hoại dạng chỏm cầu bằng cách mở rộng lý thuyết Bishop đơn giản vào không gian ba chiều. Theo đó, hệ số an toàn ổn định được xác định theo:

$$FS = \frac{\sum R_{i,j} \left[c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (w_{i,j} - u_{i,j} A_{h_{i,j}}) \tan \Phi_{i,j} \right] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum w_{i,j} (R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq} e_{i,j})} \quad (8)$$

Trong đó $A_{h_{i,j}}$ là diện tích ngang của mặt trượt giả định ở đáy của cột đất (i, j); $R_{(i,j)}$ là cánh tay đòn của lực kháng trượt hoặc là bán kính mặt trượt; $W_{i,j}$ đặc trưng cho trọng lượng

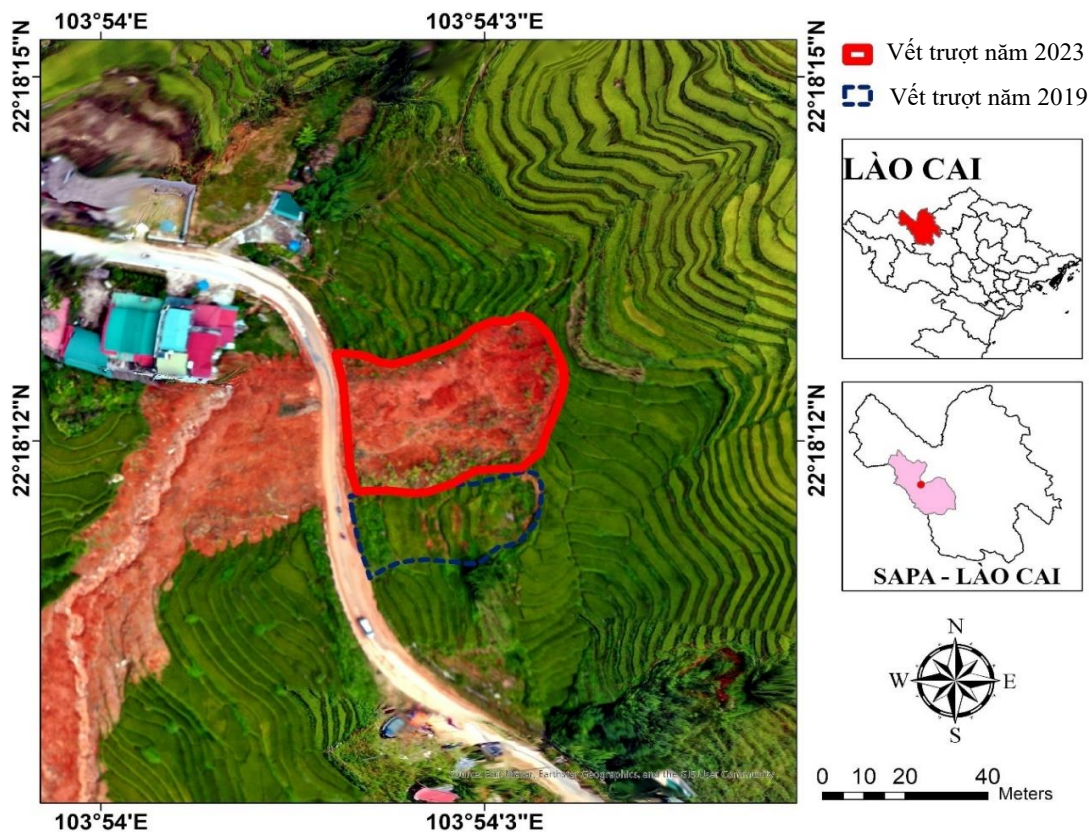
của cột đất (i, j) phía trên mặt trượt; $\alpha_{i,j}$ đặc trưng cho hướng dốc thực của đáy cột đất theo hướng trượt; k_{eq} là hệ số gia tốc động đất theo phương ngang, $e_{i,j}$ là cánh tay đòn của lực mô men lực ngang (bằng khoảng cách theo phương ngang từ tâm của cột đất đến cao độ của trục quay), và $m_{\alpha_{i,j}} = \cos \epsilon_{i,j} + (\sin \alpha_{i,j} \tan \phi_{i,j}) / F_{s3D}$; với $\epsilon_{i,j}$ = góc dốc thực của mặt trượt tính toán và mặt ngang như mô tả trong Hình 3. Cần chú ý rằng, các giá trị có thêm ký hiệu (i, j) có thể thay đổi từ cột này sang cột khác.



Hình 3. Sơ đồ tính ổn định mái dốc dùng Scoops3D [14].

d) Khu vực nghiên cứu

Vào khoảng 12:00 sáng ngày mùng 7 tháng 8 năm 2023, trên tỉnh lộ 152, tại Km9+180 xảy ra một vụ trượt lở đất nghiêm trọng làm khoảng 4700 m³ đất từ taluy dương trượt xuống đường gây tắc nghẽn giao thông trong nhiều giờ. Sát vị trí này, ngày 05/08/2019 cũng từng



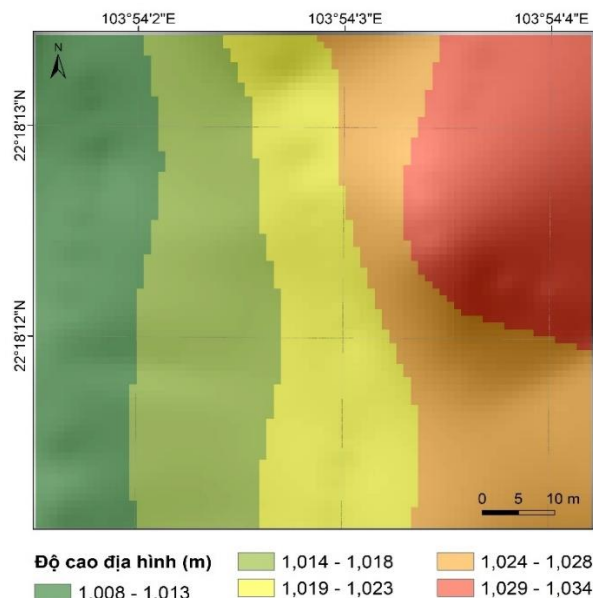
Hình 4. Vị trí điểm nghiên cứu và vết trượt xác định được từ khảo sát thực địa vẽ trên ảnh UAV.

xảy ra trượt lở làm 01 người chết. Vụ trượt đất xảy ra là kết quả của đợt mưa lớn kéo dài trong nhiều ngày khiến vật liệu phía ta luy dương trên đồi bão hòa nước. Hình 4 thể hiện vị trí điểm trượt và quy mô khối trượt.

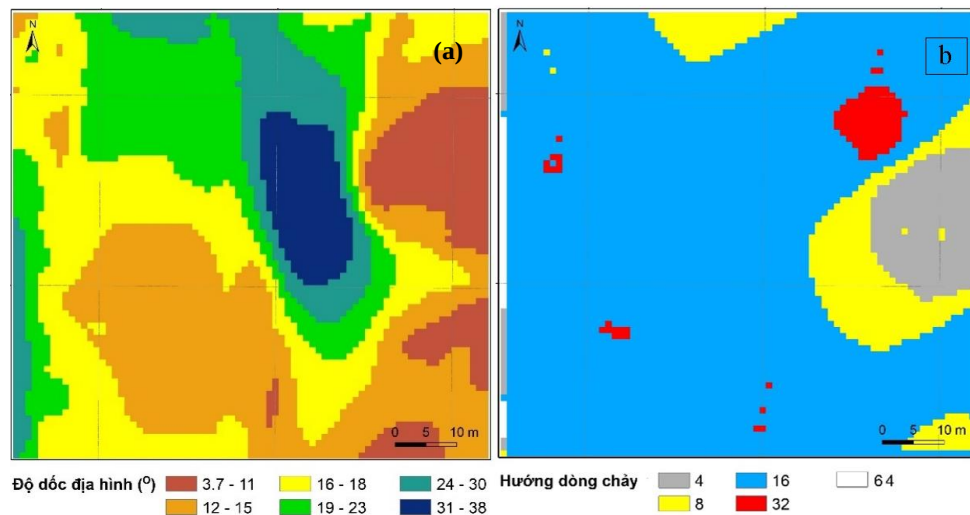
e) Các tài liệu cần thiết dùng cho tính toán

Như phần lớn các mô hình toán khác, việc cung cấp đủ và đảm bảo độ tin cậy của các thông số đầu vào chính là rào cản lớn nhất để có kết quả chính xác khi dùng TRIGRS hay Scoops3D để mô phỏng bài toán trượt lở đất. Các thông số đầu vào chính của TRIGRS và Scoops3D gồm: 1) Các đặc trưng về địa hình thể hiện qua mô hình số độ cao, bản đồ độ dốc, hướng dốc, hướng dòng chảy; 2) Phân bố chiều dày tầng phủ; 3) Phân bố áp lực nước lỗ rỗng theo không gian tại thời điểm tính toán; 4) Phân bố theo không gian một số đặc trưng cơ học của đất gồm sức kháng cắt, trọng lượng riêng, hệ số thấm của đất. Phần này sẽ trình bày chi tiết các tài liệu cần thiết phục vụ tính toán trượt lở đất khi dùng TRIGRS và khi kết hợp TRIGRS và Scoops3D.

Hiện nay, do sự phát triển của công nghệ ảnh không gian và hàng không, các bản đồ mô hình số độ cao (DEM) đang ngày càng chính xác và có độ phân giải tốt hơn. Nghiên cứu này dùng DEM với độ phân giải 1,0 m xuất từ ảnh bay UAV. Hình 5 thể hiện phân cấp cao độ khu vực nghiên cứu. Từ mô hình số độ cao, dùng phần mềm ArcGIS có thể tính được bản đồ độ dốc và hướng dòng chảy mặt. Kết quả tính được thể hiện trong Hình 6.

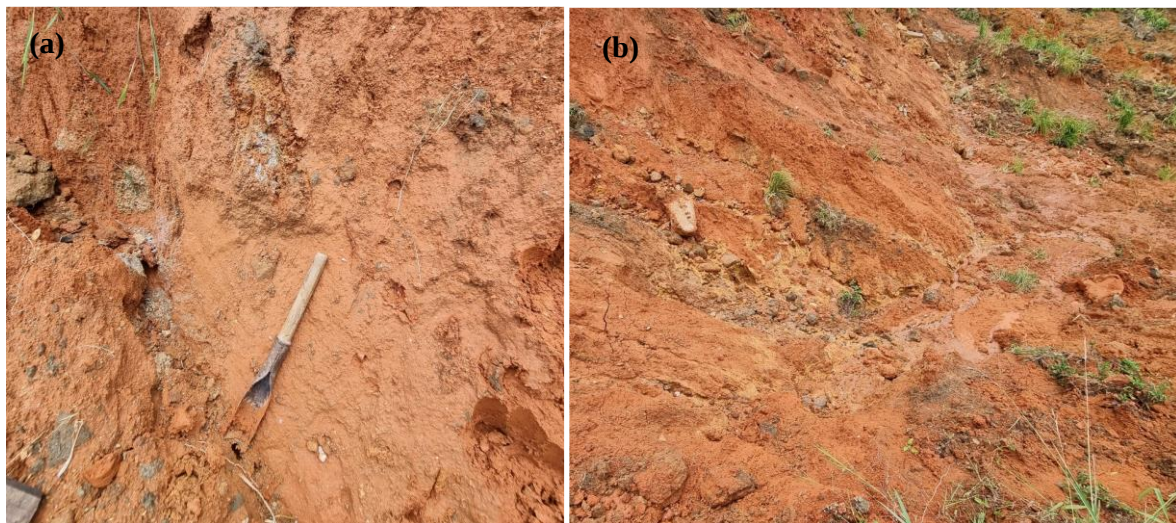


Hình 5. Mô hình số độ cao của khu vực nghiên cứu.

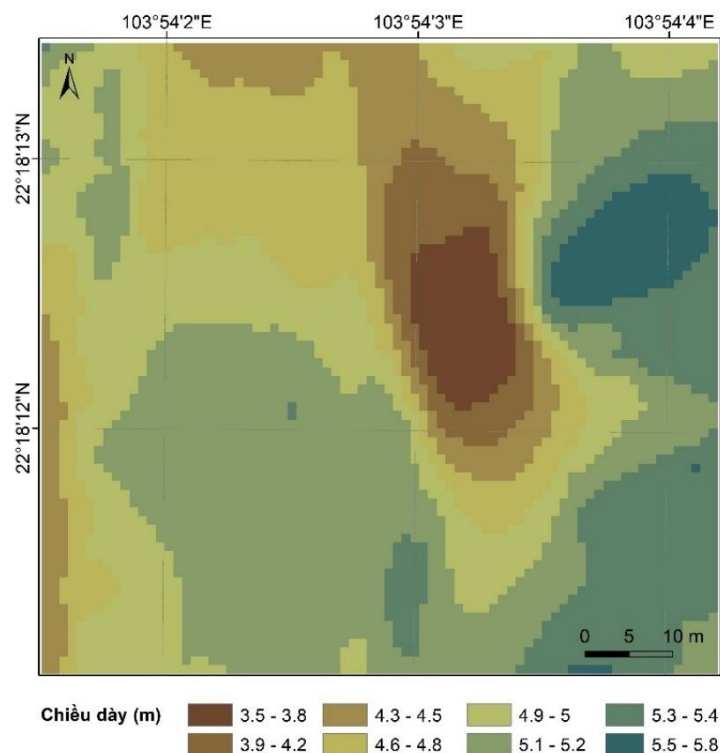


Hình 6. a) Phân bố độ dốc và b) hướng dòng chảy theo không gian.

Định nghĩa chính xác chiều dày tầng phủ làm thông số đầu vào cho TRIGRS và Scoops3D có vai trò quan trọng ảnh hưởng chất lượng của kết quả bản đồ phân bố hệ số an toàn. Tuy nhiên, việc xác định phân bố chiều dày tầng phủ trong không gian là một hàm số phụ thuộc vào rất nhiều các yếu tố như điều kiện thạch học bên dưới, độ dốc mái, loại thảm phủ phía trên,... Do vậy, việc ước lượng phân bố chiều dày tầng phủ đến thời điểm hiện tại vẫn là một thách thức [3, 15, 19]. Kết quả khảo sát hiện trường cho thấy mặt cắt địa chất ở khu vực nghiên cứu được đặc trưng bởi 2 lớp: lớp phủ tàn tích phía trên và lớp đá ít thấm bên dưới (Hình 7a). Các điểm trượt từng xảy ra ở khu vực nghiên cứu và vùng lân cận cho thấy tầng phủ tàn tích có chiều dày tối đa khoảng 6,0 m. Do đó, theo khuyến nghị của một số nghiên cứu [1, 3, 20], trong nghiên cứu này giả thiết chiều dày tầng phủ phân bố tuyến tính theo độ dốc. Theo đó, áp đặt điểm có độ dốc tối đa sẽ ứng với bề dày tầng phủ tối thiểu (0.1 m), và điểm có độ dốc tối thiểu sẽ có bề dày tầng phủ tối đa (6.0 m). Kết quả tính phân bố chiều dày tầng phủ tương ứng được thể hiện trong Hình 8.



Hình 7. Mặt phá hoại có sự hiện diện của a) lớp đá ít thấm và b) nước từ tầng phủ rỉ ra.



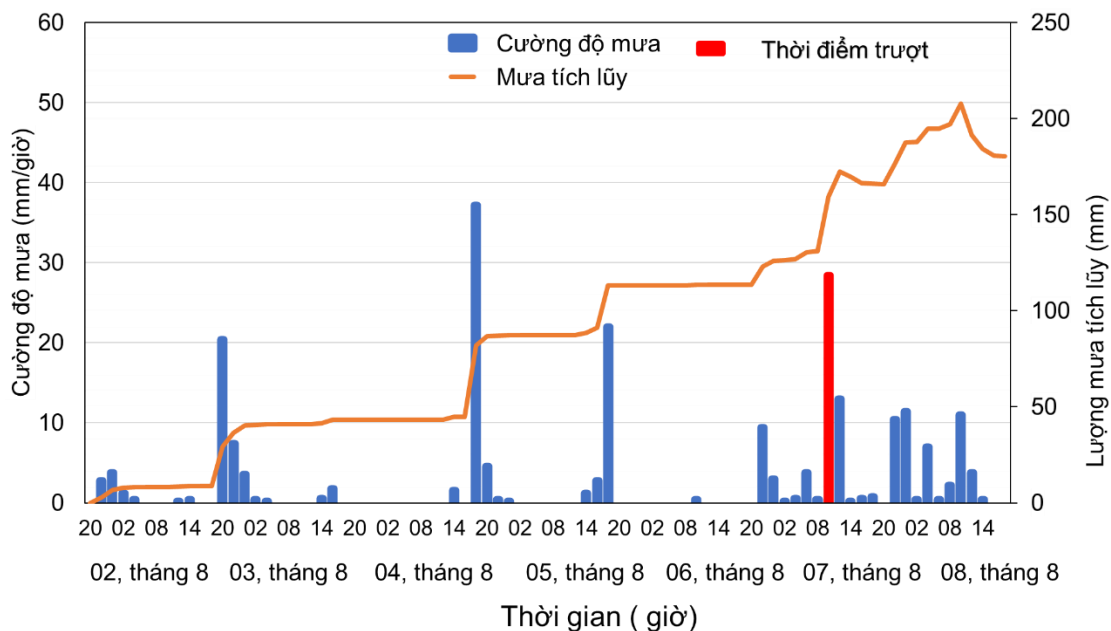
Hình 8. Phân bố chiều dày tầng phủ ở khu vực nghiên cứu.

Chỉ tiêu cơ lý của đất dùng trong phân tích ổn định mái dốc áp dụng TRIGRS và Scoops3D gồm sức kháng cắt của đất đặc trưng bởi lực dính (c), góc ma sát trong (ϕ), trọng lượng đơn vị của đất (γ), và các đặc trưng về thấm của đất. Để xác định các thông số này, các mẫu đất được lấy tại các vị trí lân cận mặt trượt để tiến hành thí nghiệm trong phòng. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 1.

Trong khu vực nghiên cứu cũng như nhiều nơi khác trên thế giới, mưa được xem là nguyên nhân phổ biến nhất gây ra hiện tượng trượt lở đất [4, 14]. Khi mưa thấm vào vùng không bão hòa của đất trong mái dốc, mực nước ngầm trong mái dốc cũng có xu hướng dâng lên. Sự thấm nước này dẫn đến sự tăng mực nước ngầm trong mái dốc, làm gia tăng áp lực nước trong lỗ rỗng. Điều này giảm đi sức kháng cắt của đất và có thể kích hoạt trượt lở đất [21]. TRIGRS cho phép nhập dữ liệu mưa là các bản đồ phân bố mưa trong không gian và theo thời gian thực. Tuy nhiên, do đối tượng nghiên cứu chỉ là một điểm trượt, chúng tôi giả định mưa phân bố đều trong không gian với cường độ và tổng lượng mưa là dữ liệu thực đo. Hình 9 thể hiện dữ liệu mưa tại trạm đo Tả Van, cách điểm nghiên cứu khoảng 1,2 km ở thời điểm trước, trong và sau khi xảy ra sự kiện trượt lở đất.

Bảng 1. Bảng các chỉ tiêu cơ lý của đất dùng trong tính toán.

Thông số	Đơn vị	Giá trị trung bình
Trọng lượng riêng γ	kN/m ³	18,1
Góc ma sát trong ϕ	(°)	14,3
Lực dính c	kN/m ²	16,9
Hệ số thấm bão hòa	m/s	$3,77 \times 10^{-6}$
Độ ẩm thể tích bão hòa θ_s		0,45
Độ ẩm thể tích dư θ_r		0,15



Hình 9. Số liệu mưa quan trắc trạm đo mưa Tả Van ở thời điểm trước, trong và sau sự kiện trượt lở (Trượt lở xảy ra vào khoảng 12:00 sáng ngày mùng 7 tháng 8 năm 2023).

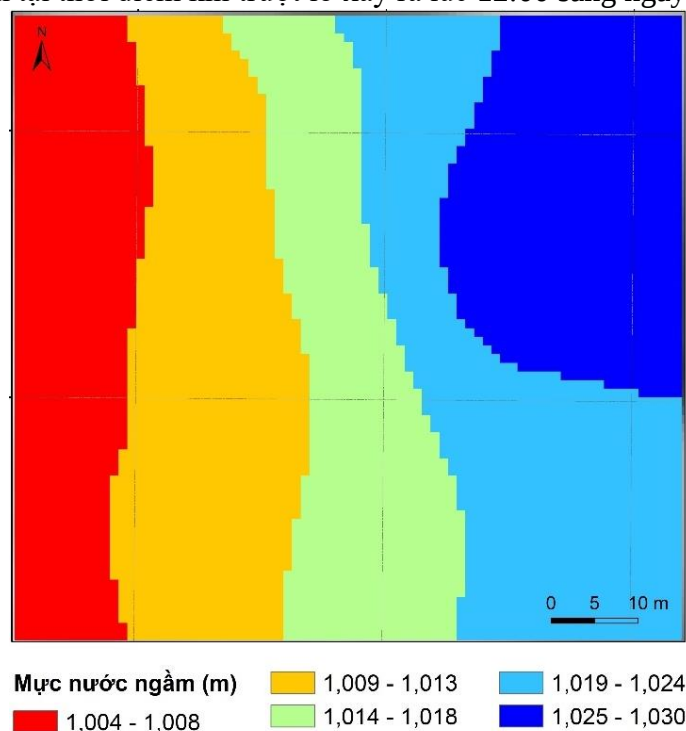
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Xác định phân bố mực nước ngầm trong mái dốc do mưa dùng TRIGRS

Theo kết quả khảo sát hiện trường sau khi xảy ra sạt lở đất, trên mặt trượt quan sát được nhiều vị trí bị sũng nước (Hình 7b), Do đó, có thể giả thiết rằng mực nước ngầm tại thời điểm

khi mưa bắt đầu trùng với ranh giới giữa lớp phủ và bề mặt lớp đá không thấm (Hình 7a). Dưới tác dụng của mưa, mực nước ngầm trong mái dốc sẽ có xu hướng dâng lên. Kết quả tính mặt đo áp đại diện cho phân bố mực nước ngầm trong điều kiện thủy tĩnh dưới bề mặt địa hình tại thời điểm quan trắc được trượt lở sẽ được dùng làm dữ liệu đầu vào của Scoops3D trong dự báo trượt lở đất.

Từ điều kiện ban đầu đã thiết lập, kết hợp với số liệu quan trắc mưa theo thời gian thực (Hình 9), TRIGRS sẽ tính lại sự phân bố mực nước ngầm. Hình 10 thể hiện kết quả tính phân bố mực nước ngầm tại thời điểm khi trượt lở xảy ra lúc 12:00 sáng ngày 07/08/2023.



Hình 10. Phân bố mực nước ngầm ở điểm nghiên cứu tại thời điểm khi sạt trượt xảy ra lúc 12 :00 sáng ngày 07/08/2023.

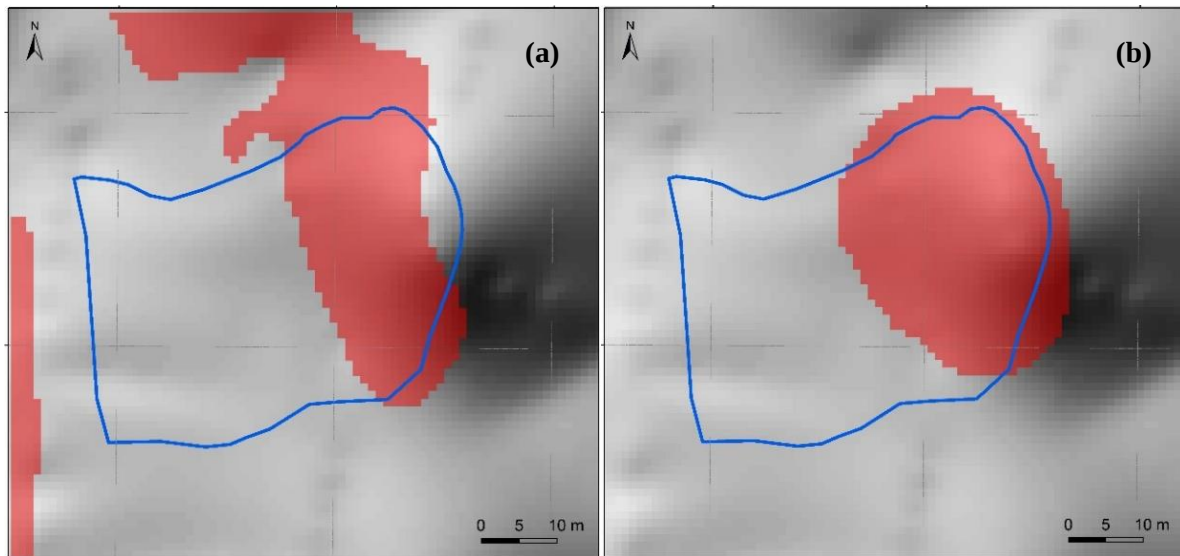
Có thể thấy rằng trong suốt quá trình mưa, mực nước ngầm trong mái dốc có xu hướng dâng cao dần. Tại thời điểm khi sạt lở đất xảy ra, đường mực nước ngầm trong mái dốc dâng cao gần như trùng với cao trình mặt đất tự nhiên. Điều này lý giải nguyên nhân gây ra sự kiện trượt lở đất trong thực tế. Phần tiếp theo, TRIGRS và TRIGRS kết hợp với Scoops3D sẽ được dùng để tính toán phân bố hệ số an toàn ổn định mái dốc theo không gian.

3.2. Xác định phân bố hệ số an toàn theo không gian

Kết quả quan trọng nhất của cả TRIGRS và Scoops3D là bản đồ thể hiện hệ số an toàn ổn định trượt FS. Hình 11 thể hiện sơ đồ phân bố hệ số an toàn ổn định mái dốc cho điểm nghiên cứu khi a) tính theo TRIGRS (mô hình mái dốc vô hạn 1D), và b) tính theo Scoops3D (mô hình cân bằng giới hạn 3D). Các khoảng phân loại giá trị FS được chia theo TCVN 13346:2021 [22]. Theo đó, với các mái dốc tiêu chuẩn đường giao thông nông thôn, hệ số an toàn ổn định FS = 1,15 là giá trị ngưỡng phân biệt giữa vùng an toàn ($FS > 1,15$) và vùng không an toàn ($FS \leq 1,15$). Hình 12 thể hiện hình ảnh trực quan vết trượt thực tế, vùng có nguy cơ trượt dự báo bởi TRIGRS và Scoops3D.

Kết quả tính trên Hình 11 cho thấy, cũng như các nghiên cứu từng áp dụng TRIGRS [2, 13, 18-19, 23] hay Scoops3D [3, 14, 17, 24, 25] để dự báo trượt lở đất, mặc dù vùng không an toàn tính toán tại thời điểm trượt và vết trượt thực tế chưa hoàn toàn khớp nhau nhưng về cơ bản, cả TRIGRS và Scoops3D đều đã dự báo khá sát vị trí điểm trượt ở tại thời điểm quan sát thấy trượt lở. Về mặt tổng quan, TRIGRS có vẻ dự báo quá vùng bị trượt khi diện tích

vùng được xếp vào nhóm không an toàn rộng hơn nhiều so với Scoops3D. Điều này sát với logic về các giả thiết được sử dụng khi phân tích ổn định mái dốc theo mô hình 1D (TRIGRS) và 3D (Scoops3D). Chi tiết về chất lượng của kết quả dự báo trượt lở đất của cả 2 mô hình sẽ được thảo luận kỹ hơn trong phần dưới đây.



Hệ số an toàn (FS) ■ < 1.15 □ Vết trượt thực tế □ > 1.15

Hình 11. Bản đồ thể hiện phân bố hệ số an toàn tính theo a) TRIGRS và b) Scoops3D theo không gian tính tại thời điểm mái dốc bị sạt trong thực tế.

3.3. Đánh giá kết quả tính toán

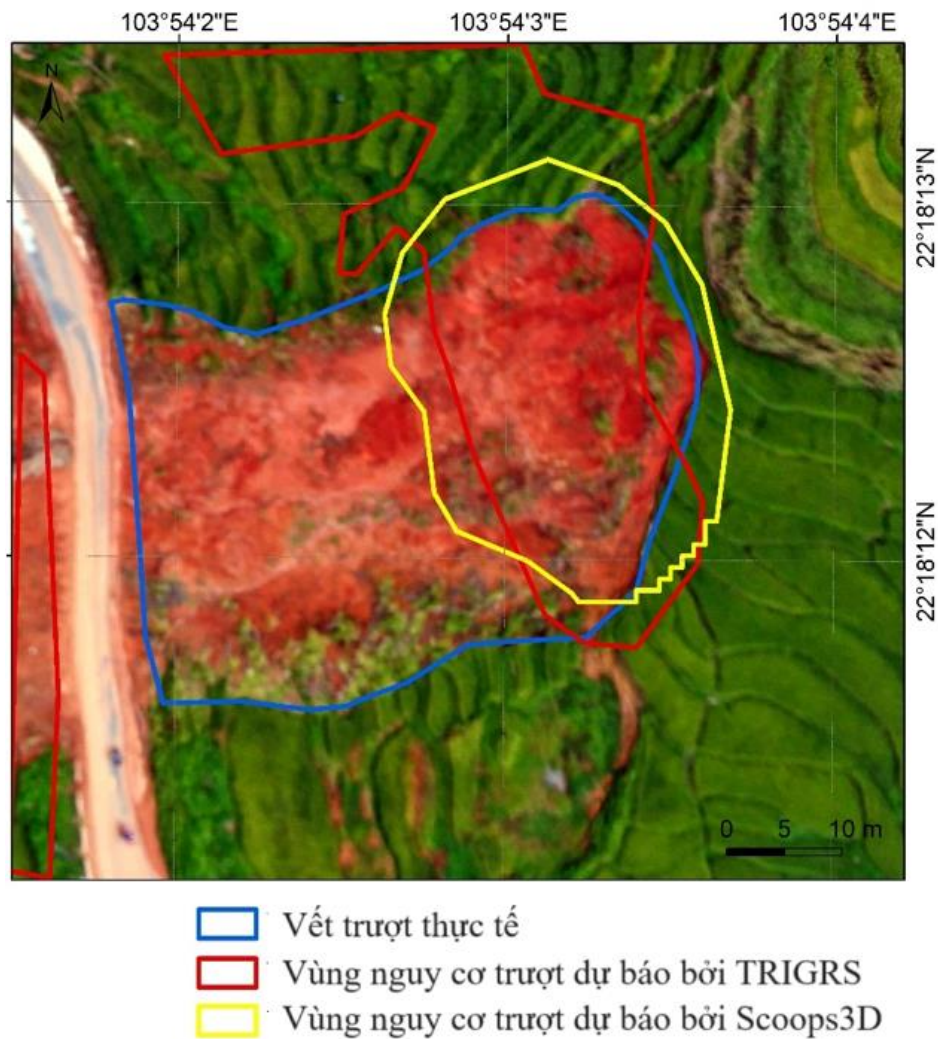
Để đánh giá chất lượng của bản đồ phân bố FS vừa dự toán, kết quả tính sẽ được so sánh với vết trượt thực tế thông qua chỉ số MSR (*Modified Success Rate*) được phát triển bởi [26]. Theo đó, kết quả trên Hình 11 là bản đồ dạng raster thể hiện phân bố hệ số an toàn theo không gian. So sánh giữa kết quả tính toán theo lý thuyết và thực tế vết trượt, có thể phân nhóm các ô lưới trong bản đồ phân bố hệ số an toàn (Hình 11) ra làm 4 vùng: 1) số ô bị trượt thực tế được dự đoán là trượt (AUU); 2) số ô trượt thực tế xảy ra trượt (TAU); 3) số ô thực tế an toàn được dự báo là an toàn (ASS); 4) số ô an toàn thực tế (TAS). Theo đó, nghiên cứu [26] định nghĩa chỉ số MSR như sau:

$$MSR = 0,5 \frac{AUU}{TAU} + 0,5 \frac{ASS}{TAS} \quad (9)$$

Trong công thức (9), có thể thấy giá trị MSR thay đổi từ 0,0 đến 1,0. Theo nghiên cứu [26], bản đồ dự đoán FS sẽ có độ chính xác cao nhất khi $0,8 \leq MSR \leq 0,9$. Khi $MSR < 0,8$, kết quả bị “dự đoán quá” (*overprediction*), ngược lại khi $MSR > 0,9$, kết quả dự đoán là thiếu (*underprediction*). Bảng 2 thể hiện kết quả tính chỉ số MSR cho Hình 11a, 11b.

Bảng 2. Kết quả tính toán chỉ số MSR (thêm 1 dòng thể hiện Success Rate (SR = AUU/TAU)).

Thông số	Đơn vị (Scoop3D)	Đơn vị (TRIGRS)
AUU	677	545
TAU	1621	1621
ASS	3656	3825
TAS	3825	4361
SR	0,42	0,34
MSR	0,69	0,59



Hình 12. Bản đồ vùng dự báo nguy cơ bị trượt đất sử dụng TRIGRS và Scoops3D trên ảnh chụp từ thiết bị bay UAV.

Từ kết quả trên Bảng 2 có thể thấy cả TRIGRS và Scoops3D đều dự báo quá so với vết trượt thực tế. Trường hợp của TRIGRS là dự báo quá về diện tích vùng bị trượt, còn trường hợp của Scoops3D là dự báo quá về vùng an toàn. Tuy nhiên, Scoops3D cho kết quả dự đoán về phạm vi khối trượt tốt hơn khi khoảng 42% số ô lưới trong khối trượt được dự đoán chính xác so với của TRIGRS là khoảng 34%.

4. Kết luận

Nghiên cứu dùng TRIGRS và kết hợp TRIGRS và Scoops3D để phân tích ổn định mái dốc cho khu vực nghiên cứu do mưa. Trong đó, TRIGRS ngoài việc dùng để phân tích trượt lở đất còn được dùng để tính sự biến đổi phân bố mực nước ngầm trong tầng phủ ứng với số liệu mưa thực đo theo thời gian. Trạng thái mực nước ngầm tại thời điểm trượt lở sẽ được trích xuất và dùng làm một trong những thông số đầu vào của Scoops3D để đánh giá ổn định mái dốc. Để kiểm chứng chất lượng của mô hình tính, bản đồ hệ số an toàn dự đoán theo cả TRIGRS và Scoops3D được so sánh với vết trượt thực tế xảy ra vào ngày mùng 7 tháng 8 năm 2023 dùng chỉ số MSR.

Ở thời điểm xảy ra trượt lở, cả TRIGRS và Scoops3D đều dự đoán khá tốt vị trí xảy ra trượt dù kết quả dự báo là “quá” so với vết trượt thực tế. Trường hợp của TRIGRS là dự báo quá về diện tích vùng bị trượt, còn trường hợp của Scoops3D là dự báo quá về vùng an toàn. Tuy nhiên, sự sai khác trong kết quả tính toán có thể do việc sử dụng các giả thiết về số liệu

đầu vào như phân bố chiều dày tầng phủ, phân bố mực nước ngầm ở thời điểm ban đầu, cũng như phân bố chỉ tiêu cơ lý của tầng phủ theo không gian chưa hợp lý. Ngoài ra, việc bỏ qua diễn tiến của khối trượt sau khi sự mất ổn định xảy ra ở một vùng cụ thể cũng có thể là nguyên nhân làm cho Scoops3D dự báo quá về vùng an toàn hoặc TRIGRS dự báo quá về vùng bị trượt.

Kết quả của mô hình tính áp dụng TRIGRS hay kết hợp giữa TRIGRS và Scoops3D đều rất nhạy với điều kiện tham số ban đầu cũng như độ tin cậy của số liệu đầu vào. Do đó, yếu tố quan trọng nhất để giảm sai số của mô hình tính là độ tin cậy của số liệu đầu vào và việc thiết lập điều kiện ban đầu. Điều này đòi hỏi khối lượng lớn các điều tra hiện trường. Đây cũng là một trong những nhược điểm của việc ứng dụng các mô hình lưới vật lý trong dự báo trượt lở đất do mưa. Ngoài ra, có thể xảy ra tình huống khi một vị trí bị sạt có thể lôi kéo các vị trí khác bị sạt theo. Do đó, trong tương lai, vẫn cần có các nghiên cứu sâu hơn để đánh giá diễn tiến khối trượt theo thời gian để mô tả được chính xác bản chất và quy mô thực tế của khối trượt.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: T.T.V., Đ.V.V.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: T.T.V., Đ.V.V.; Xử lý số liệu: N.Đ.H., N.H.D.; Phân tích mẫu: Đ.V.V., N.H.D.; Lấy mẫu: Đ.V.V., T.T.V., N.Đ.H.; Viết bản thảo bài báo: Đ.V.V., T.T.V.; Chỉnh sửa bài báo: T.T.V., N.Đ.H., N.H.D.

Lời cảm ơn: Bài báo được thực hiện có sự hỗ trợ về mặt dữ liệu của Phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật- Trường Đại học Thủy lợi.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyen, H.D.; Nguyen, T.H.; Pham, V.S.; Tran, T.V.; Nguyen, D.H. Proposed procedure of survey and model application for forecasting flow landslide susceptibility and hazards - A case study in Tam Chung commune, Thanh Hoa province. *J. Hydro-Meteorol.* **2023**, *16*, 23–37.
2. Nhật, N.V.; Trí, Đ.Q.; Tuyết, Q.T.T.; Hiền, T.D. Nghiên cứu ứng dụng mô hình TRIGRS mô phỏng trượt lở khu vực Lào Cai, Việt Nam. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2022**, *742*, 65–74.
3. Tran, T.V.; Alvioli, M.; Lee, G.H.; An, H. Three-dimensional, time-dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: A case study. *Landslides* **2018**, *15*, 1071–1084.
4. Tran, T.V.; Hoang, V.H.; Pham, H.D.; Go, S.T. và Vu, H.H. Non-linear, time-variant approach to simulate the rainfall-induced slope failure of an unsaturated soil slope: A case study in Sapa, Vietnam. *J. Disaster Res.* **2021**, *16*(4), 512–520.
5. Kiên, N.T.; Viet, T.T.; Lien, V.T.H.; Linh, P.L.H.; Thanh, N.Q. Landslide susceptibility mapping based on the combination of bivariate statistics and modified analytic hierarchy process methods: A case study of Tinh Tuc Town, Nguyen Binh District, Cao Bang Province, Vietnam. *J. Disaster Res.* **2021**, *16*(4), 521–528.
6. Lineback Gritzner, M.; Marcus, W.A.; Aspinall, R.; Custer, S.G. Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology* **2001**, *37*, 149–165.
7. Lu, N.; Godt, J.W. Hillslope hydrology and stability. Cambridge University: Cambridge University Press. Cambridge, 2012.
8. Alvioli, M.; Baum, R.L. Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. *Environ. Modell. Software* **2016**, *81*, 122–135.

9. An, H.; Viet, T.T.; Lee, G.H.; Kim, Y.; Kim, M.; Noh, S.; Noh, J. Development of time-variant landslide-prediction software considering three-dimensional subsurface unsaturated flow. *Environ. Modell. Software* **2016**, *85*, 172–183.
10. Casagli, N.; Intrieri, E.; Tofani, V.; Gigli, G.; Raspini, F. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nat. Rev. Earth Environ.* **2023**, *4*, 51–64.
11. Dietrich, W.; Montgomery, D. A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. University of California Berkeley, 1998, pp. 26.
12. Baum, R.L.; Savage, W.Z.; Godt, J.W. TRIGRS - A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid - based regional slope stability analysis, Version 2.0. U.S. Department of the Interior: Virginia, 2008, pp. 75.
13. Mark, E.R.; Sarah, B.C.; Dianne, L.B.; Scott, T.H. Scoops3D—software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape. United States Department of Interior. Virginia, USA, 2015, pp. 218.
14. Tran, T.V.; Hoang, V.H.; Pham, H.D.; Go, S.T. Use of Scoops3D and GIS for the assessment of slope stability in three-dimensional: A case study in Sapa, Vietnam. Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining, Bui, D.T. Editor, Springer Nature Switzerland: Ha Noi, 2020, pp. 210–229.
15. Tran, T.V.; Lee, G.H.; Trinh, M. Shallow Landslide Assessment Considering the Influence of Vegetation Cover. *J. Korean Geo-Envir. Soc.* **2016**, *17*(4), 17–31.
16. Iverson, R.M. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour. Res.* **2000**, *36*(7), 1897–1910.
17. Srivastava, R. và Yeh, T.C.J. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogenous and layered soils. *Water Resour. Res.* **1991**, *27*, 753–762.
18. Taylor, D.W. Fundamentals of soil mechanics. John Wiley and Sons, Inc. New York **1948**, pp. 712.
19. Tran, T.V.; Lee, G.H.; Thu, T.M.; An, H.U. Effect of digital elevation model resolution on shallow landslide modeling using TRIGRS. *Nat. Hazard Rev.* **2016**, *18*(2), 1–12.
20. Salciarini, D.; Godt, J.; Savage, W.; Conversini, P.; Baum, R.; Michael, J. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. *Landslides* **2006**, *3*(3), 181–194.
21. Tran, T.V.; Thu, T.M.; Lee, G.H.; Oh, S.; Van, N.T.H. Effect of extreme rainfall on cut slope stability: Case study in Yen Bai City, Viet Nam. *J. Korean Geo-Envir. Soc.* **2015**, *16*(4), 23–32.
22. Tổng Cục Đường Bộ Việt Nam. TCVN 13346:2021: Công trình phòng chống đất sụt trên đường ô tô - Yêu cầu khảo sát và thiết kế. Bộ Khoa học và Công nghệ: Bộ Giao thông vận tải, 2021, tr. 34.
23. Tran, T.V.; Lee, G.H.; An, H.; Kim, M.S. Comparing the performance of TRIGRS and TiVaSS in spatial and temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides. *Environ. Earth Sci.* **2017**, *76*(8), 1–16.
24. Nhu, V.H.; Duong, B.V.; Vu, H.D. 3D slopes stability modeling for landslide early warning design at Halong city area. *Journal of Mining and Earth Sciences* **2019**, *60*(6), 31–41.
25. Marín, R.J.; Jaramillo, G.R. Landslide susceptibility assessment using the Scoops3d model in a tropical mountainous terrain. *Ingeniería Y Ciencia* **2021**, *17*(33), 71–96.
26. Huang, J.C.; Kao, S.J. Optimal estimator for assessing landslide model performance. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2006**, *10*(6), 957–965.

Application of TRIGRS and integration of TRIGRS with Scoops3D in rain-induced landslide prediction

Do Van Vung¹, Nguyen Duc Ha², Nguyen Huy Duong³, Tran The Viet^{4*}

¹ Department of Civil Engineering, Thuyloi University; dovanvung.tl@gmail.com

² Viet Nam Geological Department (VGD); nh14vn@gmail.com

³ Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources;
nguyenhuyduong112358@gmail.com

⁴ Department of Civil Engineering, Thuyloi University; trantheviet@tlu.edu.vn

Abstract: This study introduces the TRIGRS and Scoops3D software in the prediction of rainfall-induced landslides. In this regard, TRIGRS was not only employed for landslide prediction but also used to simulate the distribution of the groundwater level within the soil cover layer over time. Subsequently, Scoops3D utilized the calculated distribution of groundwater table to assess the three-dimensional stability of the slope in the research area. The proposed method was applied to analyze a landslide occurrence around noon on August 7, 2023, in the Mường Hoa Valley - Sapa town. The results indicated that both TRIGRS and Scoops3D accurately identified the location of the landslide at the observed time of landslide occurrence. However, they overestimate it. TRIGRS overestimated the sliding area, while Scoops3D overestimated the safe zone. The alignment between the actual landslide scar and the hazard zone predicted by Scoops3D was better, with a matching rate of 42%, compared to TRIGRS, which had a matching rate of approximately 34%. Discrepancies in the computational results may be related to assumptions regarding input data and initial conditions before rainfall. Therefore, for regions with sufficient computational data, the proposed method will be a powerful tool in predicting rainfall-induced landslides.

Keywords: Landslide; TRIGRS; Scoops3D; Groundwater table; Slope stability.