

ĐÁNH GIÁ HIỂM HỌA SẠT LỞ ĐẤT VÀ PHÂN TÍCH ĐỘ NHẠY THAM SỐ BẰNG MÔ HÌNH KẾT HỢP MÔ PHỎNG MONTE CARLO VÀ PRCC: KHU VỰC NGHIÊN CỨU HUYỆN PHƯỚC SƠN, QUẢNG NAM

Nguyễn Bá Quang Vinh^{1,2*}, Nguyễn Văn Tĩnh³

Tóm tắt: Nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng bản đồ hiểm họa sạt lở đất và phân tích độ nhạy của các tham số đầu vào ảnh hưởng đến hệ số an toàn (FS) của mái dốc. Phương pháp mô phỏng Monte Carlo (MC) được kết hợp với mô hình mái dốc vô hạn để mô phỏng sự bất định trong các tham số gồm: độ dốc, chiều sâu lớp đất, lực dính (c), góc nội ma sát (ϕ), trọng lượng riêng (γ) và lượng mưa. Trong đó, lượng mưa được mô phỏng theo phân phối Gamma, các tham số còn lại được giả định tuân theo phân phối chuẩn. Kết quả phân tích cho thấy bản đồ hiểm họa sạt lở đất đạt độ chính xác với giá trị diện tích dưới đường cong (Area Under Curve-AUC) là 0.727, thể hiện khả năng dự báo khá tốt. Đồng thời, phân tích độ nhạy bằng hệ số tương quan thứ hạng từng phần (Partial Rank Correlation Coefficient-PRCC) chỉ ra rằng các yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến FS là các thông số sức kháng cắt của đất gồm: lực dính và góc nội ma sát. Các kết quả nghiên cứu góp phần xác định các tham số trọng yếu cần được đo đạc chính xác, đồng thời hỗ trợ công tác cảnh báo và đánh giá hiểm họa sạt lở đất ở khu vực miền núi Việt Nam.

Từ khóa: Sạt lở đất, mô phỏng Monte Carlo, mô hình mái dốc vô hạn, phân tích độ nhạy, PRCC.

1. GIỚI THIỆU

Đánh giá hiểm họa sạt lở đất, là quá trình xác định xác suất xảy ra sạt lở tại một khu vực trong một khoảng thời gian cụ thể, đóng vai trò quan trọng trong công tác quản lý rủi ro thiên tai, đặc biệt tại các khu vực miền núi dễ bị tổn thương. Các nghiên cứu truyền thống thường sử dụng cách tiếp cận định hướng (deterministic), trong đó các tham số đầu vào như độ dốc, thảm phủ, tính chất đất, mưa cực đoan hoặc gia tốc động đất được giả định là giá trị cố định. Các mô hình như Newmark displacement (ND) hay quan hệ cường độ-thời gian-tần suất (IDF) đã được áp dụng rộng rãi để dự báo sạt lở do mưa và động đất (Kim and Chung, 2016; Du & Wang, 2016; Borga et al., 2002). Tuy nhiên, các mô hình này tồn tại những hạn chế đáng kể do bỏ qua sự bất định vốn có của môi trường tự nhiên, yêu cầu dữ liệu đầu vào chất lượng cao và thường đơn giản hóa các quá trình vật lý. Để khắc phục điều này, các nghiên cứu gần đây đã chuyển sang hướng tiếp cận xác suất (probabilistic) bằng cách tích hợp các yếu tố bất định vào mô hình thông qua kỹ thuật mô phỏng Monte Carlo (MC). Chẳng hạn, Haneberg, (2004) đã

đánh giá hiểm họa sạt lở bằng cách xét đến phân bố xác suất của hệ số an toàn; Zolfaghari and Heath, (2008) đề xuất mô hình ổn định mái dốc 2D có xét đến bất định của lực cắt đất, độ sâu bão hòa và xác suất vượt ngưỡng của gia tốc nền. Gần đây hơn, Nguyen and Kim, (2020) đã kết hợp mô phỏng MC và mô hình giả tĩnh để đánh giá hiểm họa sạt lở đất cho mưa và động đất gây ra. Những nghiên cứu này cho thấy rằng việc tích hợp bất định vào các mô hình đánh giá hiểm họa sạt lở không chỉ nâng cao độ tin cậy của kết quả dự báo mà còn phản ánh tốt hơn bản chất ngẫu nhiên, phức tạp của các hiện tượng địa chất nguy hiểm.

Trong bối cảnh mô phỏng xác suất bằng phương pháp Monte Carlo được áp dụng rộng rãi để đánh giá hiểm họa sạt lở đất, phân tích độ nhạy tham số (sensitivity analysis) đóng vai trò then chốt nhằm xác định mức độ ảnh hưởng của từng biến đầu vào đến kết quả mô phỏng. Do các tham số địa kỹ thuật và môi trường như độ dốc, chiều sâu lớp đất, tính chất cơ lý của đất hay lượng mưa cực đoan thường mang tính bất định cao, việc hiểu rõ tầm quan trọng tương đối của từng tham số là điều cần thiết để tinh giản mô hình, tăng hiệu quả tính toán và hướng đến việc thu thập dữ liệu có trọng tâm. Trong mô phỏng MC, nếu không phân tích độ nhạy, mô hình có thể trở nên dư thừa hoặc không hiệu quả khi các tham số ít ảnh hưởng lại chiếm dụng tài nguyên tính toán đáng kể. Các chỉ số phân tích như hệ số tương quan thứ hạng riêng phần (Partial Rank Correlation

¹TS. Khoa Kỹ thuật và Quản lý Xây dựng, Trường Đại học Quốc tế, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Đại học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

³GS.TS. Chủ nhiệm Chương trình KHCN “Nghiên cứu khoa học và công nghệ phục vụ bảo đảm an ninh nguồn nước và an toàn đập, hồ chứa nước” - KC.14/21-30, Nguyên Tổng cục trưởng Tổng cục Thủy lợi

* Tác giả liên hệ

Coefficient-PRCC) thường được sử dụng để định lượng tác động của từng tham số đến xác suất sạt lở. Việc kết hợp phân tích độ nhạy với mô phỏng MC không chỉ giúp làm rõ cơ chế chi phối hiểm họa sạt lở mà còn nâng cao độ tin cậy và khả năng áp dụng thực tiễn của mô hình trong cảnh báo sớm và quy hoạch giảm thiểu rủi ro thiên tai.

Việt Nam nằm trong khu vực nhiệt đới, chịu ảnh hưởng của nhiều kiểu khí hậu như cận nhiệt đới ẩm, xavan và gió mùa nhiệt đới. Mỗi năm, Việt Nam hứng chịu trên 10 cơn bão cùng nhiều đợt mưa lớn, đặc biệt ảnh hưởng nghiêm trọng đến khu vực miền Trung. Với địa hình đồi núi chiếm khoảng 3/4 diện tích lãnh thổ, sạt lở đất trở thành hiện tượng thiên tai tái diễn thường xuyên, gây thiệt hại lớn về người, trung bình hơn 100 ca tử vong mỗi năm. Theo thống kê từ Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, giai đoạn 2012-2020 ghi nhận hơn 13,000 điểm sạt lở tại 21 tỉnh, trong đó Quảng Nam, Quảng Trị và Thừa Thiên Huế là các điểm nóng với mật độ sạt lở cao. Thực trạng này cho thấy nhu cầu cấp thiết trong việc nghiên cứu, đánh giá hiểm họa sạt lở đất và xây dựng chiến lược giảm thiểu rủi ro hiệu quả tại miền Trung Việt Nam.

Tỉnh Quảng Nam thường xuyên xảy ra các vụ sạt lở đất nghiêm trọng, đặc biệt ở các huyện miền núi như Bắc Trà My, Nam Trà My và Phước Sơn, gây thiệt hại lớn về người và tài sản; tiêu biểu là các sự kiện sạt lở đất năm 2020 làm hàng chục người thiệt mạng và hư hại nặng cơ sở hạ tầng. Tại Quảng Nam, hướng nghiên cứu chủ đạo là lập bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở phục vụ quy hoạch dân cư và phòng chống thiên tai, với cách tiếp cận tích hợp nhiều nhân tố tự nhiên-xã hội trong môi trường GIS. Hoàng Ngọc Tuấn, (2019) đề xuất các giải pháp dự báo, cảnh báo sớm và phòng chống sạt lở cho ba huyện Bắc Trà My, Nam Trà My, Phước Sơn. Nghiên cứu của các tác giả Hoàng Ngọc Tuấn và Võ Thị Tuyết, (2021) tích hợp AHP-GIS để xác định trọng số các nhân tố và chồng lớp trong ArcGIS, qua đó lập bản đồ nguy cơ cho ba huyện miền núi trọng điểm, Quảng Nam. Nhìn chung, các nghiên cứu đã tạo nền tảng khoa học quan trọng, song cần mở rộng sang đánh giá hiểm họa sạt lở đất dựa trên sự kết hợp giữa mô hình không gian-thời gian và dữ liệu mưa thực đo, nhằm xác định xác suất xảy ra sạt lở theo thời gian, không gian; qua đó xây dựng bản đồ hiểm họa hỗ trợ cảnh báo sớm và quy hoạch giảm thiểu rủi ro.

Từ những phân tích trên, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp nhằm nâng cao độ chính xác và độ tin cậy trong đánh giá hiểm họa sạt lở đất tại khu vực đồi núi tỉnh Quảng Nam thông qua việc tích hợp

mô phỏng Monte Carlo và phân tích độ nhạy tham số. Cụ thể, các tham số đầu vào như độ dốc, chiều sâu lớp đất, tính chất cơ lý của đất và lượng mưa được mô phỏng dưới dạng phân bố xác suất nhằm phản ánh tính bất định thực tế trong điều kiện tự nhiên. Thông qua hàng nghìn lần mô phỏng MC, phân bố xác suất sạt lở đất tại từng vị trí được ước lượng. Sau đó, hệ số tương quan thứ hạng riêng phần được sử dụng để phân tích độ nhạy, xác định mức độ ảnh hưởng tương đối của từng tham số đầu vào đến kết quả mô phỏng. Phương pháp này không những cung cấp bản đồ xác suất sạt lở mang tính định lượng và giàu thông tin hơn, mà còn hỗ trợ xác định các yếu tố kiểm soát chính, từ đó ưu tiên thu thập và giám sát dữ liệu một cách hiệu quả hơn trong công tác phòng tránh thiên tai.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng một quy trình mô hình hóa tích hợp các phương pháp gồm: phương pháp tổng hợp-thu thập tài liệu, phương pháp xử lý bản đồ/ảnh viễn thám, phương pháp phân tích mô hình thấm 1D Green-Ampt để mô tả quá trình thấm, phương pháp phân tích ổn định mái dốc vô hạn, phương pháp mô phỏng Monte Carlo trong GIS để lập bản đồ hiểm họa, và phương pháp phân tích độ nhạy PRCC để đánh giá tầm quan trọng các tham số đầu vào của mô hình mái dốc vô hạn. Trong khuôn khổ này, các tham số đầu vào được xem là biến ngẫu nhiên nhằm phản ánh bất định tự nhiên: độ dốc ($^{\circ}$), chiều sâu lớp đất (m), lực dính (kPa), góc ma sát trong ($^{\circ}$), trọng lượng riêng đất (kN/m^3) giả định phân phối chuẩn, còn cường độ mưa (mm/ngày) theo phân phối Gamma phù hợp tính không đối xứng và giá trị không âm của dữ liệu mưa miền Trung Việt Nam.

Phương pháp nghiên cứu được trình bày trong Hình 1, gồm các bước chính như sau:

(i) Thu thập dữ liệu kiểm kê sạt lở đất, các thông số đầu vào cho mô hình mái dốc vô hạn và dữ liệu mưa cực đại ngày.

(ii) Phân tích các thông số đầu vào, bao gồm: độ dốc, chiều sâu lớp đất, trọng lượng riêng, lực dính, và góc nội ma sát tuân theo các phân phối chuẩn. Phân tích lượng mưa cực đại ngày theo phân phối Gamma.

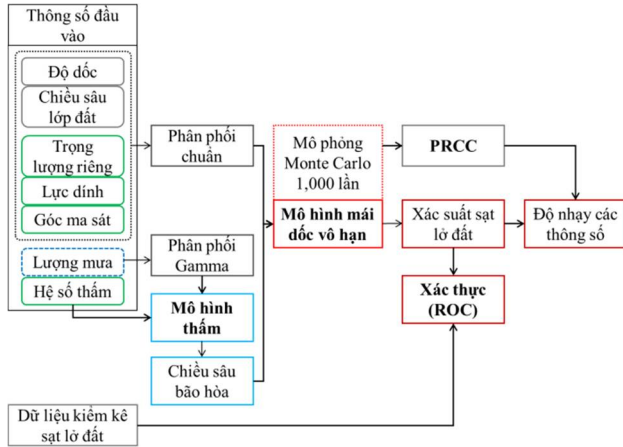
(iii) Thiết lập mô hình kết hợp giữa mô hình mái dốc vô hạn và mô hình thấm do mưa, trong đó hệ số an toàn (FS) được tính toán tại từng điểm dựa trên các thông số đầu vào được lấy ngẫu nhiên từ các phân phối tương ứng.

(iv) Thực hiện 1,000 mô phỏng Monte Carlo để ước tính phân bố xác suất của FS và xác định xác suất sạt lở đất tại từng vị trí.

(v) Xây dựng bản đồ hiểm họa sạt lở đất dạng

xác suất, thể hiện rõ xác suất sạt lở đất phân bố theo không gian. Đánh giá độ chính xác của bản đồ hiểm họa sạt lở đất dựa trên giá trị diện tích dưới đường cong (Area Under Curve-AUC).

(vi) Phân tích độ nhạy bằng PRCC để xác định mức độ ảnh hưởng tương đối của từng thông số đầu vào đến xác suất sạt lở đất.



Hình 1. Sơ đồ quy trình xây dựng bản đồ hiểm họa sạt lở đất và đánh giá độ nhạy tham số

2.1. Mô hình thấm

Trong nghiên cứu này, mô hình thấm Green-Ampt được sử dụng để mô phỏng quá trình thấm nước do mưa và xác định chiều sâu tầng đất bão hòa (h_w) tại các thời điểm mưa cực đoạn. Mô hình Green-Ampt dựa trên giả thuyết tồn tại một mặt ướt rõ ràng di chuyển thẳng đứng từ bề mặt xuống lớp đất bên dưới trong quá trình thấm. Mô hình cho phép tính toán lượng thấm tích lũy và tốc độ thấm dựa trên các thông số thủy lực của đất và đặc điểm lượng mưa đầu vào. Chiều sâu tầng đất bão hòa tại từng vị trí địa hình được xác định dựa vào công thức Green-Ampt như sau:

$$h_w = \frac{|\psi|K_s}{R - K_s} + \frac{K_s(t - t_p)}{\theta_s - \theta_i} - |\psi| \ln \left(\frac{1 + \frac{K_s}{R - K_s}}{1 + \frac{h_w}{|\psi|}} \right) \quad (1)$$

$$t_p = \frac{|\psi|K_s(\theta_s - \theta_i)}{R(R - K_s)} \quad (2)$$

Ở đây, t : thời gian mưa, t_p : thời điểm xuất hiện dòng chảy mặt (h), K_s : hệ số thấm bão hòa (m/h), ψ : lực hút mao dẫn ở mặt ướt (m), θ_s : độ ẩm bão hòa, θ_i : độ ẩm ban đầu của đất, R : Cường độ mưa (m/h).

Phương trình (1) được giải lặp để tìm giá trị h_w tương ứng với thời gian mưa t .

2.2. Mô hình mái dốc vô hạn

Để đánh giá hệ số an toàn của mái dốc chịu tác động của mưa, nghiên cứu này áp dụng mô hình mái dốc vô hạn. Đây là mô hình cơ học đơn giản nhưng

hiệu quả, đặc biệt phù hợp cho các sườn dốc có chiều dài và chiều rộng lớn so với chiều sâu tầng đất trượt. FS tại từng vị trí địa hình được tính toán bằng công thức:

$$FS = \frac{c + (\gamma h - \gamma_w h_w) \tan \varphi}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} \quad (3)$$

Trong đó, c : lực dính của đất (kPa), γ : trọng lượng riêng của đất (kN/m³), γ_w : trọng lượng riêng của nước (kN/m³), h : chiều sâu lớp đất (m), h_w : chiều sâu tầng đất bão hòa (m) được tính từ mô hình Green-Ampt, φ : góc nội ma sát của đất (°), β : độ dốc (°).

Giá trị h_w được lấy từ kết quả mô phỏng thấm Green-Ampt với lượng mưa cực đoạn được lấy mẫu từ phân phối Gamma. Trong quá trình mô phỏng Monte Carlo, các tham số địa kỹ thuật như độ dốc, chiều sâu tầng đất, lực dính, góc nội ma sát và trọng lượng riêng được lấy mẫu từ các phân phối chuẩn phản ánh tính bất định tự nhiên. Hệ số an toàn FS được tính cho từng lần mô phỏng, từ đó xác định phân bố xác suất trượt của mái dốc tại mỗi vị trí không gian.

2.3. Quá trình mô phỏng Monte Carlo

Trong nghiên cứu này, phương pháp mô phỏng Monte Carlo được áp dụng nhằm đánh giá xác suất sạt lở đất (Landslide Probability-LP) tại khu vực nghiên cứu, với việc tích hợp đầy đủ các yếu tố bất định của tham số đầu vào vào quá trình tính toán. Các tham số chính bao gồm: độ dốc, chiều sâu tầng đất, lực dính, góc nội ma sát, trọng lượng riêng của đất được mô phỏng theo phân phối chuẩn và lượng mưa cực đại được lấy mẫu từ phân phối Gamma.

Quy trình mô phỏng MC được thực hiện theo các bước chính sau:

- Khởi tạo số vòng lặp (N): Số lần mô phỏng 1,000 lần được lựa chọn để đảm bảo độ tin cậy thống kê.
- Lấy mẫu tham số ngẫu nhiên: Ở mỗi vòng lặp, các giá trị tham số đầu vào được lấy mẫu ngẫu nhiên từ phân phối xác suất tương ứng.
- Tính toán chiều sâu bão hòa: Sử dụng mô hình Green-Ampt với lượng mưa từ phân phối Gamma để tính toán giá trị h_w tương ứng cho vòng lặp đó.
- Tính hệ số an toàn FS: Áp dụng mô hình mái dốc vô hạn để tính FS cho từng tổ hợp tham số đầu vào.
- Xác định trạng thái ổn định: Nếu $FS < 1.0$, vòng lặp đó được coi là trạng thái trượt; nếu $FS \geq 1.0$, mái dốc ổn định.
- Tính xác suất sạt lở đất: Xác suất sạt lở tại từng vị trí được xác định bằng tỷ lệ số lần trượt ($FS < 1.0$) trên tổng số vòng lặp mô phỏng.

2.4. Phân tích độ nhạy tham số

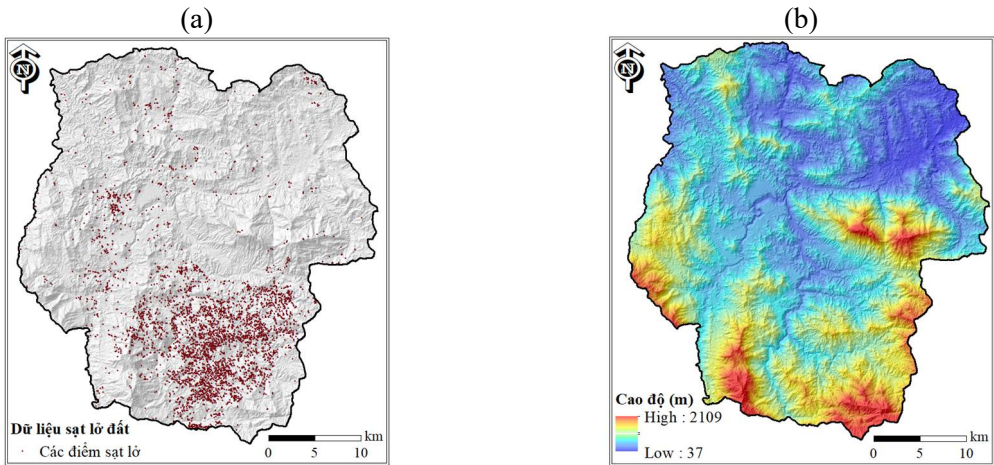
Nghiên cứu tiến hành phân tích độ nhạy tham số bằng phương pháp hệ số tương quan thứ hạng riêng

phần. PRCC là một phương pháp thống kê mạnh, cho phép đánh giá mức độ ảnh hưởng tương đối của từng biến đầu vào lên biến đầu ra FS trong điều kiện các tham số khác được giữ ổn định. Hệ số PRCC dao động từ -1 đến 1, trong đó giá trị dương thể hiện tham số có quan hệ thuận chiều với FS (làm tăng FS), giá trị âm thể hiện quan hệ nghịch chiều (làm giảm FS). Độ lớn của PRCC thể hiện mức độ ảnh hưởng của tham số đến sự biến thiên của FS. Kết quả phân tích PRCC giúp xác định được những tham số chi phối chính đến xác suất sạt lở, từ đó hỗ trợ việc ưu tiên thu thập dữ liệu chính xác hơn ở các tham số quan trọng, đồng thời cung cấp thông tin đầu vào hữu ích cho công tác quản lý và phòng chống thiên tai.

3. Dữ liệu nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện tại khu vực Phước Sơn, tỉnh Quảng Nam, miền Trung Việt Nam, nơi địa hình đồi núi chiếm khoảng 72% diện tích với độ cao phổ biến từ 500–1,000 m. Khu vực này có khí hậu nhiệt đới gió mùa với lượng mưa lớn kéo dài, gây ra nhiều vụ sạt lở đất trong giai đoạn 2012–2020, tập trung dọc các tuyến giao thông huyết mạch và đặc biệt nghiêm trọng tại các huyện Bắc Trà My, Nam Trà My, Tiên Phước và Phước Sơn. Để xây dựng tập dữ liệu sạt lở, tổng cộng 3,000 điểm sạt lở do mưa lớn được xác định thông qua phân tích ảnh Landsat 8, chồng ghép ảnh Google Earth và kiểm tra thực địa bằng GPS (Hình 2a). Tập dữ liệu sạt lở đất

được sử dụng để đánh giá hiệu suất mô hình. Hình 2b trình bày bản đồ số độ cao (DEM) của khu vực nghiên cứu với độ phân giải 30 m, được sử dụng làm cơ sở để tính toán bản đồ độ dốc và chiều sâu lớp đất. Độ dốc tại mỗi điểm được tính toán dựa trên hàm đạo hàm bậc hai từ giá trị độ cao lân cận trong DEM, trong khi chiều sâu lớp đất được ước tính theo mô hình Z-index dựa trên quan hệ hình thái giữa địa hình và phân bố đất phong hóa tại khu vực miền núi. Các tham số địa kỹ thuật của đất được tổng hợp từ dữ liệu thực địa và tài liệu địa phương, với giá trị trung bình và độ lệch chuẩn được trình bày trong Bảng 1. Dữ liệu mưa được thu thập từ các trạm khí tượng trong khu vực nghiên cứu giai đoạn 1981–2015, trong đó giá trị lượng mưa cực đại ngày đo được là 259 mm/ngày. Trung bình, khu vực này ghi nhận khoảng 15 ngày mưa lớn mỗi năm, với tổng lượng mưa trung bình năm đạt 3,302 mm và số ngày mưa trung bình 136 ngày/năm. Các đặc điểm lượng mưa cho thấy khu vực thường xuyên chịu ảnh hưởng của các trận mưa kéo dài và cường độ lớn, đặc biệt trong mùa mưa từ tháng 9 đến tháng 12. Để phản ánh sự biến thiên tự nhiên của lượng mưa trong mô phỏng, giá trị mưa cực đại ngày được giả định tuân theo phân phối Gamma. Các giá trị mưa lấy mẫu từ phân phối Gamma sẽ được sử dụng làm đầu vào cho mô hình thấm Green-Ampt, giúp xác định chiều sâu tầng đất bão hòa trong quá trình đánh giá hiểm họa sạt lở đất.



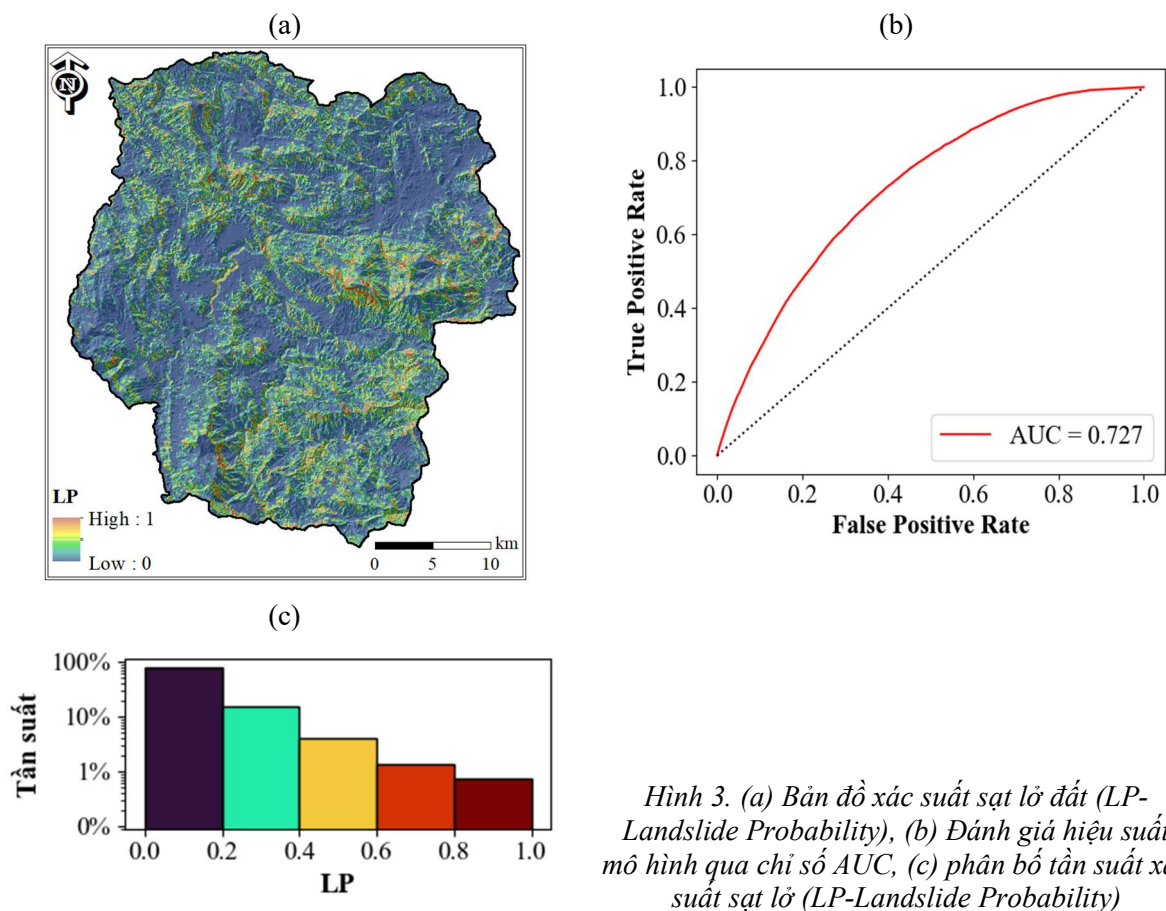
Hình 2. (a) Bản đồ dữ liệu sạt lở đất, (b) Bản đồ số độ cao

Bảng 1. Các tính chất cơ lý của đất

Tính chất	COV*	Tham khảo COV	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Trọng lượng riêng (γ , kN/m ³)	0.08	Nguyen and Kim, (2020)	19	1.52
Lực dính (c , kN/m ²)	0.275		4	1.1
tan (góc nội ma sát) (tan (ϕ))	0.15		0.445	0.067
Hệ số thấm (K_s , m/h)			0.0036	
Độ ẩm ban đầu (θ_i)			0.2	

Tính chất	COV*	Tham khảo COV	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Độ ẩm bão hòa (θ_s)			0.42	
Lực hút mao dẫn (ψ , m)			0.2	

* COV: hệ số biến thiên; độ lệch chuẩn = (giá trị trung bình) $\times$ COV

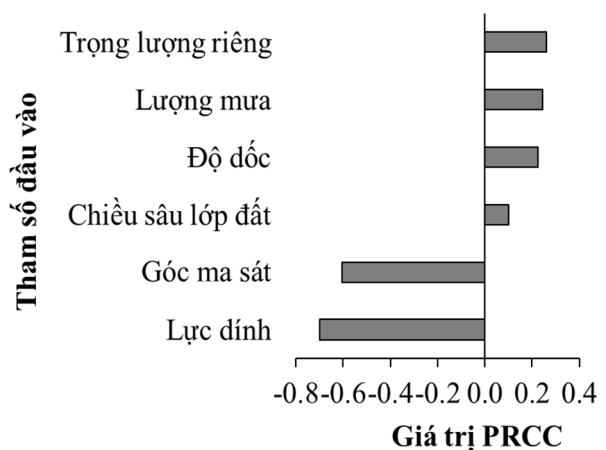


Hình 3. (a) Bản đồ xác suất sạt lở đất (LP-Landslide Probability), (b) Đánh giá hiệu suất mô hình qua chỉ số AUC, (c) phân bố tần suất xác suất sạt lở (LP-Landslide Probability)

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 3a trình bày bản đồ xác suất sạt lở đất được xây dựng từ kết quả mô phỏng Monte Carlo kết hợp mô hình mái dốc vô hạn. Bản đồ cho thấy các khu vực có giá trị LP cao phân bố chủ yếu các lưu vực sông, suối và nơi có địa hình dốc đứng; phù hợp với các điểm sạt lở thực tế đã được ghi nhận trong giai đoạn khảo sát. Hình 3b thể hiện đường cong ROC (Receiver Operating Characteristic) đánh giá hiệu suất mô hình dự báo LP, với diện tích dưới đường cong (AUC) đạt giá trị 0.727. Kết quả này cho thấy mô hình có khả năng phân loại mức độ hiểm họa sạt lở ở mức chấp nhận được, phản ánh mối quan hệ hợp lý giữa các yếu tố địa hình, đất và lượng mưa đầu vào. Mặc dù giá trị AUC chưa đạt mức rất cao (>0.8), nhưng đối với các bài toán có tính bất định tham số địa chất-môi trường lớn như sạt lở đất, kết quả này vẫn cho thấy phương pháp tiếp cận xác

suất dựa trên mô phỏng Monte Carlo kết hợp mô hình thấm Green-Ampt và mô hình mái dốc vô hạn là khả thi và có tiềm năng ứng dụng thực tiễn.



Hình 4. Phân tích độ nhạy tham số

Hình 3c thể hiện phân bố tần suất của xác suất sạt lở được tính từ mô phỏng Monte Carlo. Kết quả cho thấy phần lớn các điểm có LP nhỏ hơn 0.2, chiếm tỷ lệ cao nhất, trong khi các giá trị LP lớn hơn 0.6 chỉ chiếm tỷ lệ rất thấp. Phân bố này cho thấy đa số khu vực nghiên cứu nằm trong mức nguy cơ sạt lở thấp đến trung bình, chỉ một số ít vị trí có nguy cơ cao. Xu hướng giảm dần của tần suất theo LP cũng phản ánh đặc trưng ổn định tương đối cao của địa hình hiện tại, song các vùng có LP > 0.6 cần được ưu tiên theo dõi và đánh giá chi tiết hơn.

Hình 4 trình bày kết quả phân tích độ nhạy tham số thông qua hệ số tương quan thứ hạng riêng phần giữa các tham số đầu vào và xác suất sạt lở đất (xác suất FS < 1). Kết quả cho thấy, lực dính và góc ma sát trong là hai yếu tố có ảnh hưởng ngược chiều rõ rệt đến hiểm họa sạt lở, với hệ số PRCC âm lần lượt khoảng -0.70 và -0.60. Điều này phản ánh vai trò quan trọng của các đặc tính kháng cắt của đất trong việc làm giảm xác suất sạt lở, khi giá trị lực dính và góc ma sát tăng lên sẽ giúp mái dốc ổn định hơn (giảm xác suất FS < 1). Ngược lại, các tham số trọng lượng riêng, độ dốc và lượng mưa cực đại có hệ số PRCC dương đáng kể khoảng +0.30, cho thấy đây là các yếu tố làm gia tăng xác suất sạt lở. Độ dốc lớn làm tăng thành phần trượt của trọng lực, trong khi lượng mưa cao dẫn đến tăng áp lực nước lỗ rỗng, đều là những nguyên nhân chính làm giảm FS. Chiều sâu tầng đất có hệ số PRCC nhỏ hơn, thể hiện mức độ ảnh hưởng thấp hơn trong mô hình hiện tại.

Kết quả phân tích PRCC giúp làm rõ các yếu tố chi phối chính đến hiểm họa sạt lở tại khu vực nghiên cứu, trong đó yếu tố địa hình (độ dốc) và mưa lớn là các tác nhân chính làm tăng hiểm họa, trong khi các đặc tính kháng cắt của đất có vai trò then chốt trong việc giữ ổn định mái dốc.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã xây dựng một quy trình mô phỏng tích hợp nhằm đánh giá hiểm họa sạt lở đất tại khu vực miền núi tỉnh Quảng Nam, kết hợp mô hình thấm Green-Ampt, mô hình mái dốc vô hạn và mô phỏng Monte Carlo để phản ánh các yếu tố bất định trong điều kiện địa hình, địa chất và khí hậu. Kết quả mô phỏng cho thấy các khu vực có địa hình dốc lớn, lượng mưa cực đoan cao là những vùng có hiểm họa sạt lở cao, phù hợp với các điểm sạt lở thực tế được ghi nhận. Phân tích ROC cho thấy mô hình đạt AUC = 0.727, thể hiện khả năng phân loại hiểm họa sạt lở ở mức chấp nhận được. Đặc biệt, phân tích độ nhạy bằng PRCC đã xác định được các tham số chi phối chính đến hiểm họa sạt lở là độ dốc, lượng mưa, lực dính và góc ma sát trong. Điều này cho thấy sự cần thiết của việc tập trung thu thập dữ liệu chính xác hơn về các yếu tố này trong các nghiên cứu tiếp theo. Phương pháp tiếp cận xác suất được đề xuất không chỉ giúp lượng hóa hiểm họa sạt lở một cách toàn diện hơn, mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho các chiến lược phòng chống thiên tai hiệu quả tại các khu vực miền núi Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Hoàng Ngọc Tuấn. (2019). *Một số giải pháp dự báo, cảnh báo sớm và phòng chống sạt lở đất phục vụ bố trí dân cư ở 3 huyện Nam Trà My, Bắc Trà My, Phước Sơn tỉnh Quảng Nam*.
- Hoàng Ngọc Tuấn., & Võ Thị Tuyết. (2021). *Nghiên cứu xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở đất cho khu vực miền núi tỉnh Quảng Nam*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ thủy lợi.
- Borga, M., Fontana, G. D., & Cazorzi, F. (2002). *Analysis of Topographic Control on Shallow Landsliding Using a Quasi-Dynamic Wetness Index*. Journal of Hydrology, 268(1–4), 56–71.
- Du, W., & Wang, G. (2016). *A one-step Newmark displacement model for probabilistic seismic slope displacement hazard analysis*. Engineering Geology, 205, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.02.011>
- Haneberg, W. C. (2004). *A rational probabilistic method for spatially distributed landslide hazard assessment*. Environmental and Engineering Geoscience, 10(1), 27–43. <https://doi.org/10.2113/10.1.27>
- Kim, H.-S., & Chung, C.-K. (2016). *Development and Application of GIS-based Information System of Landslide Hazard Map Induced by Earthquakes and Rainfall in Korea*. GISTAM, 227–234. <https://doi.org/10.5220/0005866802270234>
- Nguyen, V. B.-Q., & Kim, Y.-T. (2020). *Rainfall-Earthquake-Induced Landslide Hazard Prediction by Monte Carlo Simulation: A Case Study of MT. Umyeon in Korea*. KSCE Journal of Civil Engineering, 1–14.
- Zolfaghari, A., & Heath, A. C. (2008). *A GIS application for assessing landslide hazard over a large area*. Computers and Geotechnics, 35(2), 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.03.007>

Abstract:
**LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT AND PARAMETER SENSITIVITY
ANALYSIS USING A MODEL INTEGRATING MONTE CARLO SIMULATION AND PRCC:
A CASE STUDY IN PHUOC SON, QUANG NAM**

This study develops a probabilistic landslide hazard map and evaluates the sensitivity of input parameters influencing slope stability. The infinite slope model is integrated with Monte Carlo simulation to represent uncertainties in slope angle, soil depth, cohesion, internal friction angle, unit weight, and rainfall. Rainfall is modeled using a Gamma distribution, while other parameters are assumed to follow normal distributions. The resulting hazard map achieved an Area Under the Curve value of 0.727, indicating good predictive performance. Sensitivity analysis using the Partial Rank Correlation Coefficient showed that the most influential parameters are soil cohesion and internal friction angle. The results provide a scientific basis for improving landslide hazard assessment and early warning in mountainous regions of Vietnam.

Keywords: Landslide, Monte Carlo simulation, infinite slope model, sensitivity analysis, PRCC (Partial Rank Correlation Coefficient).

Ngày nhận bài: 05/9/2025

Ngày chấp nhận đăng: 27/11/2025