



Đánh giá phương pháp lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất: Yêu cầu và thách thức

A review on landslide susceptibility mapping methods: Needs and challenges

Nguyễn Văn Toàn*

Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

Từ khóa:

Học máy
Phân tích dữ liệu lớn
Phương pháp tích hợp
Trượt lở đất
Viễn thám và GIS

TÓM TẮT

Nghiên cứu xây dựng bản đồ nguy cơ trượt lở đất (LSM) là nội dung khoa học quan trọng để quản lý rủi ro và lập kế hoạch sử dụng đất ở những vùng dễ bị trượt lở đất. Các phương pháp LSM đã phát triển đáng kể, kết hợp những tiến bộ trong viễn thám, học máy, phân tích dữ liệu lớn và các phương pháp tiếp cận liên ngành. Nghiên cứu này trình bày một cách ngắn gọn các phương pháp phân tích và thực nghiệm được phát triển phổ biến nhất trong lĩnh vực này và tóm tắt những phát hiện quan trọng từ các nghiên cứu trước đây. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng việc tích hợp các phương pháp LSM sao cho phù hợp với đặc điểm khu vực cụ thể và nhu cầu của cơ quan quản lý là cần thiết để đánh giá, quản lý rủi ro trượt lở đất toàn diện và hiệu quả nhằm phát huy ưu điểm và hạn chế nhược điểm của từng nhóm phương pháp. Ngoài ra, phương pháp tích hợp có thể luận giải vấn đề trượt lở đất dựa trên phát huy tối đa nguồn cơ sở dữ liệu hiện có, và xét đến dữ liệu được cập nhật trong tương lai.

Keywords:

Big data analytics
Integrated approaches
Machine learning algorithms
Landslide susceptibility mapping
Remote sensing and GIS techniques

ABSTRACT

Research and development of landslide susceptibility mapping (LSM) are crucial scientific content for risk management and land-use planning in landslide-prone areas. LSM methods have evolved significantly, incorporating advances in remote sensing and GIS techniques, machine learning algorithms, big data analytics, and interdisciplinary approaches. This research effort presents briefly the most commonly developed empirical and analytical methodologies concisely and summarizes the crucial findings from prior works. Results indicate that integrating approaches to adapt specific regional characteristics and demands of management agencies is necessary for assessment and management to promote assets and avoid the limitations of individual methods for assessing and managing landslide risks comprehensively and effectively. Furthermore, the integrated approaches could explain the landslide problem by exploiting the maximum efficiency of most of the existing database resources and considering updated data in the future.

* Nguyễn Văn Toàn. Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh.

Email: nguyenvantoan@iuh.edu.vn

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.13\(6\).1-16](https://www.doi.org/10.55228/JTST.13(6).1-16)

Ngày nhận bài: 18/5/2024; Ngày nhận bài sửa: 30/10/2024; Ngày chấp nhận đăng: 04/11/2024

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/11/2024

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Trượt lở đất (sạt lở đất) là một dạng tai biến địa chất có tính nguy hiểm cao [1], [2]. Những thập kỷ gần đây, tình hình trượt lở đất ở Việt Nam nói riêng và trên thế giới nói chung ở mức đáng báo động [1]. Việt Nam là quốc gia thuộc khu vực chịu nhiều thảm họa thiên nhiên, trong đó, ảnh hưởng đáng kể đều liên quan đến sạt lở đất, gây ra những hậu quả nghiêm trọng về người, tài sản, và hạ tầng công trình [1], [3].

Trượt lở đất là hiện tượng xảy ra khi có một khối đá hoặc một tầng đất hay những khối mảnh vụn của đất đá rời rạc trượt từ sườn núi hoặc đồi, thậm chí lớp địa tầng bị trượt [4], [5]. Bản chất của hiện tượng trượt lở đất là liên kết trong cấu trúc đất đá của khu vực bị suy yếu do tác động bên ngoài, dẫn tới chúng không còn đủ chắc chắn để giữ vững cấu trúc ban đầu; trong điều kiện chịu thêm các tải trọng tác động thì nguy cơ xảy ra sạt trượt tăng lên [4]. Trượt lở đất là hiện tượng thiên tai tiềm tàng đe dọa rất lớn tới sinh mạng, cuộc sống của con người và hạ tầng công trình xây dựng kiến trúc. Do đó, nghiên cứu xây dựng bản đồ nguy cơ trượt lở đất (Landslide Susceptibility Mapping, LSM) trở thành một nội dung khoa học quan trọng với mỗi vùng, địa phương, hoặc quốc gia để quản lý rủi ro và lập kế hoạch sử dụng đất ở những nơi có đất dễ xảy ra trượt lở.

Trượt lở đất là một trong những hiểm họa địa chất có tính chất tiềm ẩn, và có xu hướng thường xuất hiện vào mùa mưa [2]. Do biến đổi khí hậu toàn cầu, tần suất trượt lở đất ngày càng tăng, kéo theo đó là những tổn thất và thiệt hại liên quan đến lở đất cũng tăng cao [1]. Vì vậy, dự báo chính xác diễn biến trượt lở đất, giám sát, cảnh báo sớm các nguy cơ xảy ra sạt lở đất là nhiệm vụ cần thiết nhằm giảm thiểu thiệt hại, tổn thất do trượt lở đất gây ra [6]. Fu và cộng sự [4] đề cập, thảo luận so sánh các mô hình và

phương pháp dự báo trượt lở đất áp dụng trên một số quốc gia. Nhiều nghiên cứu khác nhau về lập bản đồ hoặc dự đoán trượt lở đất đã thực hiện; tuy nhiên, mỗi khu vực, quốc gia có những điều kiện đặc thù, khả năng áp dụng, và nhu cầu về độ tin cậy hay chi tiết khác nhau để lập LSM theo nhiều tỷ lệ bản đồ [5], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

Khả năng hay nguy cơ xảy ra trượt lở đất (landslide susceptibility) đề cập đến xác suất xuất hiện trượt lở đất ở một khu vực cụ thể do các đặc điểm vốn có của nó. LSM là bản đồ kết quả để thể hiện mô tả về xác suất khả năng trượt lở đất. Về cơ bản, LSM không dự đoán thời khắc lở đất sẽ xảy ra nhưng có thể xác định các khu vực dễ xuất hiện lở đất trong một số điều kiện kích thích nhất định (ví dụ như mưa lớn hoặc tác động bên ngoài khác) và cung cấp thông tin phân vùng không gian địa lý. Tùy vào từng mục tiêu và phạm vi của nghiên cứu khác nhau, LSM có thể được phân chia tăng dần theo nhiều cấp độ chi tiết, thông thường từ ba cấp (thấp → trung bình → cao) đến năm cấp độ nguy cơ (rất thấp → thấp → trung bình → cao → rất cao) [5], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

Nhìn chung, mục đích của phân vùng mức độ trượt lở đất này là hỗ trợ thông báo (cho các đối tượng liên quan, chẳng hạn, chính quyền địa phương, người dân, các nhà quy hoạch, các nhà đầu tư phát triển) về những khu vực có khả năng xảy ra lở đất cao hơn, hỗ trợ trong việc quy hoạch sử dụng đất, quy định phân vùng và quản lý thiên tai. Từ đó, có thể xây dựng các phương án để giảm thiểu rủi ro thiệt hại do trượt lở đất có thể gây ra cho khu vực.

Dự báo trượt lở đất trước hết phải giải quyết một số vấn đề cơ bản ảnh hưởng đến tính chính xác của dự báo, có thể kể đến như lựa chọn thông số dự báo, phân tích và xử lý số liệu khảo sát hay quan trắc, xác định các giai đoạn dịch chuyển của đất, phân loại và

phân tích mô hình dự báo, phân loại và phân tích các tiêu chí dự báo [13], [14], [15]. Điều này cho thấy, việc lập LSM là sự tiếp cận liên ngành, cần xem xét đến nhiều khía cạnh và nhiều yếu tố có thể ảnh hưởng trực tiếp hoặc gián tiếp đến cơ chế trượt lở đất.

Về cơ bản, các nhà nghiên cứu đã đề xuất nhiều phương pháp lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất như một phần của quản lý nguy cơ trượt lở đất, được phân thành hai nhóm chính là phương pháp thực nghiệm và phương pháp phân tích [5], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]. Với phương pháp thực nghiệm, việc điều tra quy mô trượt lở đất nhằm phát triển cơ sở dữ liệu về lịch sử trượt lở, kết hợp với phương pháp thống kê để thiết lập LSM. Trong khi đó, phương pháp phân tích dựa trên giới hạn về ứng xử, thuộc tính cơ lý của mái dốc.

Mục đích của nghiên cứu này là trình bày một cách ngắn gọn các phương pháp phân tích và thực nghiệm được phát triển phổ biến nhất trong lĩnh vực này. Đồng thời, tóm tắt những phát hiện quan trọng từ các nghiên cứu trước đây như tập trung vào các tham số và chỉ số nổi bật để lập LSM.

2. Phương pháp đánh giá thực nghiệm

Các phương pháp đánh giá thực nghiệm dựa trên phân tích thống kê về các vụ trượt lở đất trước đây và mối quan hệ của chúng với các yếu tố kiểm soát khác nhau. Mục này giới thiệu phương pháp kiểm kê trượt lở đất nổi bật để xây dựng cơ sở dữ liệu về trượt lở đất và phương pháp thống kê áp dụng nhằm xử lý cơ sở dữ liệu.

2.1. Phương pháp kiểm kê trượt lở đất

Công tác kiểm kê trượt lở đất (Landslide Inventory Method) được xem như là phương pháp sơ khai và cơ bản để thiết lập LSM [5], [20]. Việc kiểm kê trượt lở đất giữ

vai trò quan trọng không thể bỏ qua trong bước lập LSM, mặc dù, đã có các phương pháp khác, bởi vì nó cung cấp dữ liệu cơ bản và thực tế bước đầu để xác định và phân tích các khu vực dễ bị trượt lở đất. Phương pháp kiểm kê liên quan đến việc lập danh mục một cách có hệ thống các vụ lở đất trong quá khứ để hiểu được sự phân bố, tần suất và đặc điểm của chúng theo chuỗi thời gian thống kê và vùng không gian địa lý cần kiểm kê [10], [21]. Do đó, phương pháp kiểm kê có thể kết hợp được với các phương pháp khác để xây dựng LSM nhằm dự báo khả năng xảy ra trượt lở đất [15], [22].

Để xây dựng bộ cơ sở dữ liệu kiểm kê có độ tin cậy cao phục vụ dự báo trượt lở đất, công tác kiểm kê cần tiến hành liên tục và xuyên suốt trong một khoảng thời gian đủ lớn [5], [15], [20], [22]. Trong khi đó, nhiều yếu tố ảnh hưởng đến khả năng xảy ra trượt lở đất có thể thay đổi theo thời gian (ví dụ, hình thái địa hình, lớp phủ thực vật, khí tượng); chúng là các thách thức trong công tác kiểm kê. Từ đó, các chuyên gia khuyến nghị việc xác thực độ tin cậy nguồn dữ liệu kiểm kê trong phân tích xây dựng LSM [23], [24], trước khi tiến hành tính toán khả năng xảy ra trượt lở đối với các vị trí khác trong khu vực. Vì vậy, độ tin cậy của LSM bị suy giảm nếu chỉ dựa vào hoàn toàn từ phương pháp kiểm kê, đặc biệt khi số vị trí kiểm kê chưa đủ để mang tính đại diện cho toàn bộ khu vực trên bản đồ cần lập LSM [24].

2.2. Phương pháp thống kê áp dụng thiết lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất

Phương pháp thống kê được áp dụng rộng rãi trong việc thiết lập LSM vì chúng có thể phân tích dữ liệu lớn về trượt lở đất và định lượng mối quan hệ giữa sự xuất hiện trượt lở đất và các yếu tố ảnh hưởng khác nhau (xem Bảng 1) [4], [12], [14], [17], [18], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42].

Một số nghiên cứu đã áp dụng phương pháp thống kê quan trọng trong lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất: Tần suất (Frequency Ratio, FR); trọng số bằng chứng (Weight of Evidence, WoE); hồi quy logistic (Logistic Regression, LR); phân tích tương quan (Correlation Analysis); phân tích thống kê đa biến (Multivariate Statistical Analysis); phân tích thống kê không gian (Spatial Analysis); thuật toán học máy (Machine Learning Algorithms, MLA).

Sử dụng MLA cũng đã trở nên phổ biến trong việc thiết lập LSM, đặc biệt nhiều MLA được phát triển khác nhau [9], [16], [17], [18], [19]. Đây là chương trình máy tính sử dụng kinh nghiệm hoặc mẫu kiểm kê trong quá khứ để tối ưu hóa tiêu chí hiệu suất bằng cách học từ mẫu. Thuật toán rừng ngẫu nhiên (Random Forest Algorithm) là một phương pháp thống kê mô hình hóa bằng máy (Machine Learning Statistic) dùng để phục vụ các mục đích phân loại, tính hồi quy và các nhiệm vụ khác bằng cách xây dựng nhiều cây quyết định (decision tree) [43], [44]. Trong khi đó, máy vector hỗ trợ (Support Vector Machine, SVM) là một kỹ thuật học máy giúp phân loại dữ liệu thành các danh mục khác nhau. Trong việc lập LSM, SVM tìm hiểu mô hình của các vụ lở đất trong quá khứ và dự đoán mức độ nguy cơ xảy ra trượt lở cho các khu vực mới dựa trên mô hình đã học. Phương pháp học máy dựa trên trọng số (Weight-Based Machine Learning Methods) có thể bị thiên vị bởi chuyên gia trong việc xác định trọng số đối với các yếu tố ảnh hưởng tới trượt lở đất. Các phương pháp thống kê được áp dụng để xác nhận và đánh giá hiệu suất của các mô hình trượt lở đất. Các kỹ thuật như phân tích đặc tính vận hành máy thu (Receiver Operating Characteristic, ROC), tính toán diện tích dưới đường cong (Area Under The Curve, AUC) và xác thực

chéo được sử dụng để đánh giá độ chính xác và độ tin cậy của mô hình [31], [40]. Giá trị AUC càng lớn, tính phù hợp của mô hình thiết lập bản đồ càng cao. Mỗi phương pháp thống kê đều có điểm mạnh và điểm yếu, việc lựa chọn phụ thuộc vào các yếu tố như tính sẵn có của dữ liệu, đặc điểm khu vực nghiên cứu và chuyên môn của nhà nghiên cứu. Vì vậy, việc kết hợp các phương pháp hoặc cách tiếp cận tổng thể có thể mang lại kết quả chắc chắn hơn trong việc đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất.

Nhìn chung các phương pháp thống kê đã góp phần hỗ trợ lập LSM [42]. Tuy nhiên, phương pháp thống kê chủ yếu tập trung vào việc tạo ra bộ cơ sở dữ liệu thống kê để thiết lập LSM và đánh giá so sánh giữa các phương pháp thống kê với nhau; thay vì, đi sâu vào sự phân tích cơ chế và nguyên nhân của vấn đề trượt lở [4], [12], [14], [17], [18], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42]. Vì vậy, một số thiết lập LSM gần đây khi sử dụng phương pháp thống kê thường xem xét thêm nhiều tiêu chí điển hình về trượt lở đất (có thể kể đến như độ cao, độ dốc, hướng dốc, chiều dài thoát nước, đặc điểm đới đứt gãy, đặc điểm tầng phủ, đặc điểm kiến tạo, lượng mưa) để tăng cơ sở tin cậy cho bản đồ trượt lở [7], [15], [21], [25], [27]. Kết quả cho thấy mô hình rừng ngẫu nhiên (random forest model) cho kết quả AUC cao trong phương pháp phân tích thống kê khi xem xét nhiều tiêu chí [15].

Ở một nghiên cứu khác [45], dựa trên dữ liệu kiểm kê của 495 vụ trượt lở đất, cho thấy có sự khác nhau đáng kể trong việc áp dụng phương pháp phân tích thống kê cùng một khu vực cụ thể. Kết quả phân tích từ nghiên cứu [45] chỉ ra rằng mô hình tần suất đáng tin cậy hơn so với trọng số bằng chứng và giá trị thông tin (95% so với 87% và 73%).

Bảng 1. Phương pháp thống kê áp dụng thiết lập LSM.

TT	Phương pháp	Đặc điểm nổi bật	Tham chiếu
1	Tần suất (Frequency Ratio, FR)	So sánh tần suất trượt lở đất trong từng loại điều kiện cụ thể với tần suất trượt lở đất trong toàn bộ khu vực nghiên cứu. Các khu vực có tỷ lệ tần số cao hơn được xem là dễ bị trượt lở đất. Tần suất có thể xác định dựa trên Định lý Bayes [31].	[14], [30], [31], [45]
2	Trọng số bằng chứng (Weight of Evidence, WoE)	Đánh giá mối quan hệ giữa các yếu tố điều kiện và sự xuất hiện trượt lở đất bằng cách tính tỷ lệ chênh lệch cho từng loại yếu tố so với một loại tham chiếu. Có thể kết hợp phân tích thứ bậc (Analytical Hierarchy Process, AHP) hoặc so sánh cặp để so sánh các yếu tố dựa trên tầm quan trọng tương đối của chúng trong việc gây ra lở đất. Sau đó, tổng hợp những so sánh này để lấy trọng số cho từng yếu tố nhằm xây dựng LSM. Phương pháp AHP là phương pháp bán định tính dựa trên việc cân nhắc và sắp xếp các yếu tố khác nhau ảnh hưởng đến sự xuất hiện của trượt lở đất. Tuy nhiên, AHP phụ thuộc vào ý kiến chủ quan của chuyên gia dựa trên kiến thức kinh nghiệm.	[14], [32], [45]
3	Hồi quy logistic (Logistic Regression, LR)	Mô hình hóa xác suất xảy ra trượt lở đất như là một hàm của một hoặc nhiều biến dự báo. Nó ước tính các hệ số cho từng yếu tố dự báo, cho biết cường độ và hướng ảnh hưởng của chúng đối với khả năng xảy ra lở đất.	[4], [25], [26], [27], [28], [29]
4	Phân tích tương quan (Correlation Analysis)	Phân tích tương quan đánh giá cường độ và hướng của mối quan hệ tuyến tính giữa sự xuất hiện trượt lở đất và các yếu tố điều hòa khác nhau. Nó giúp xác định các biến có mối tương quan chặt chẽ với khả năng xảy ra lở đất.	[35], [38]
5	Phân tích thống kê đa biến (Multivariate Statistical Analysis)	Các kỹ thuật như phân tích thành phần chính, phân tích nhân tố và phân tích cụm được sử dụng để xác định các mô hình và mối tương quan giữa nhiều biến số ảnh hưởng đến khả năng xảy ra lở đất. Những phương pháp này giúp giảm kích thước và xác định các yếu tố quan trọng nhất.	[12], [33], [34], [35]
6	Phân tích thống kê không gian (Spatial Analysis)	Các phương pháp thống kê không gian (phân tích tự tương quan không gian, phân tích điểm nóng và kỹ thuật nội suy không gian) được sử dụng để phân tích sự phân bố không gian của trượt lở đất và xác định các khu vực có nguy cơ xảy ra trượt lở đất.	[33], [36], [37], [38]
7	Thuật toán học máy (Machine Learning Algorithms, MLA)	Các MLA như cây quyết định (decision tree algorithm), rừng ngẫu nhiên (random forest), máy vector hỗ trợ (Support Vector Machine, SVM) và mạng lưới thần kinh nhân tạo (Artificial Neural Network, ANN) thường được sử dụng trong lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất. Các thuật toán này học hỏi từ dữ liệu trượt lở lịch sử để dự đoán mức độ nguy cơ xảy ra trượt lở đất ở các khu vực mới bằng cách sử dụng các hệ số điều kiện.	[17], [18], [38], [39], [40], [41]

3. Phương pháp đánh giá phân tích số

Các phương pháp đánh giá phân tích để lập bản đồ nhạy cảm trượt lở đất bao gồm việc sử dụng các mô hình toán học và nguyên lý vật lý để hiểu các yếu tố góp phần gây ra hiện tượng trượt lở đất. Do đó, phương pháp liên quan đến phân tích số có tính chất định lượng một cách trực diện, đi sâu vào bản chất của cơ chế trượt lở đất [46], [47], [48]. Những phương pháp phân tích số này thường tập trung vào việc tìm hiểu các quá trình và cơ chế vật lý kiểm soát độ ổn định của mái dốc. Mỗi phương pháp số có những đặc thù riêng, gồm ưu điểm và hạn chế. Phân tích số là bước cơ sở để thiết lập LSM. Các phân tích điển hình được trình bày trong những tiểu mục dưới đây.

3.1. Phân tích bằng mô hình mô phỏng

Các mô hình mô phỏng nhằm mô tả và biểu diễn các quá trình vật lý về ổn định mái dốc [49], [50]. Quy trình phân tích ổn định mái dốc bằng mô hình mô phỏng sơ họa như Hình 1. Các yếu tố như địa hình, tính chất đất, lượng mưa và thảm thực vật cần được xem xét để dự đoán các khu vực dễ trượt lở đất. Sự xuất hiện của nhiều mô hình số hai chiều, ba chiều (2D/3D) mô phỏng và phân tích ổn định mái dốc trong các điều kiện tác động phức tạp (ví dụ, mực nước ngầm thay đổi, dưới tác động của mưa) [46], [47]. Kết quả từ các mô hình toán cho phép nhìn nhận hiện tượng sạt trượt đất một cách toàn diện hơn, đúng bản chất vật lý hơn so với phương pháp quan sát khác.

Cơ chế kết hợp địa - thủy - cơ học (geo-hydro-mechanical mechanism) của các lớp trượt lở đất nhấn mạnh tầm quan trọng của sự phối hợp giữa phân tích địa chất - địa mạo và mô hình thủy văn - thủy lực trong việc diễn giải sự mất ổn định độ dốc, xác định nguyên nhân và dự đoán diễn biến của quá trình theo thời gian [48]. Phương pháp mô

hình toán mô phỏng ổn định mái dốc đang bùng nổ trong kỷ nguyên số nhờ sự phát triển vượt bậc của máy tính điện tử. Đặc biệt, ứng xử của đất theo điều kiện phi tuyến được thể hiện cho phép mô tả đúng hơn ứng xử của đất dưới các tác động bên ngoài [46], [47]. Tuy nhiên, một trong những hạn chế của các mô hình 2D hay 3D nói trên là khả năng dự báo diễn biến dài hạn bởi việc mô phỏng tốn nhiều thời gian để tạo lập mô hình mới khi có sự thay đổi về thông số hình học của mô hình. Hệ số an toàn trượt (Factor of Safety, FS) là giá trị định lượng, được sử dụng phổ biến để biểu thị mức độ an toàn chung của mái dốc (FS có thể được tổng quát hóa như phương trình (1)) [46], [47].

$$FS = \frac{\sum \text{tác động giữ}}{\sum \text{tác động gây trượt}} \quad (1)$$



Hình 1. Quy trình tổng quát phân tích ổn định của mái dốc bằng mô hình mô phỏng.

Đối với bài toán ổn định trượt của mái dốc, tồn tại nhiều yếu tố ngẫu nhiên, trong đó có một số yếu tố như: (i) yếu tố ngẫu nhiên mang tính khách quan (các yếu tố gắn liền với sự ngẫu nhiên của thiên nhiên); (ii) yếu tố ngẫu nhiên mang tính chủ quan (sự ngẫu nhiên của mô hình tính toán, phương pháp tính toán, công thức kinh nghiệm mô tả đặc điểm vật lý của đất; sự ngẫu nhiên của các kết quả thí nghiệm thông số vật lý của đất; sự ngẫu nhiên của dữ liệu đầu vào bao gồm sai số do đo đạc, khảo sát, thí nghiệm; sai số do xử lý dữ liệu). Trong đó, các yếu tố ngẫu

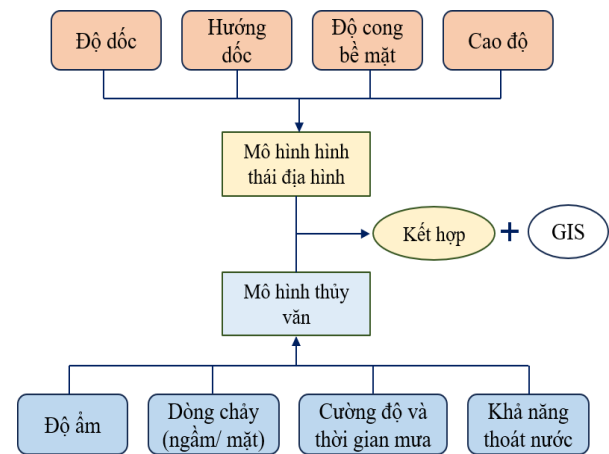
nhiên chủ yếu trong bài toán ổn định trượt bao gồm đặc tính vật lý của đất; yếu tố ngẫu nhiên trong mô hình tính, phương pháp tính; áp lực nước [51].

Phân tích độ tin cậy độ ổn định mái dốc (Reliability Analysis of Soil Slope Stability) theo phương pháp Bayesian có xét đến tính ngẫu nhiên (Technical Framework Of Spatial Random Field-Based Bayesian Method) dự đoán một cách định lượng các tai biến địa chất trượt lở (landslide geohazards), đặc biệt đối với điều kiện đất không bão hòa nhận lượng mưa lớn chưa từng có [52], [53]. Phương pháp này có thể dung hòa một cách có hệ thống kiến thức trước đó, dữ liệu khoan khảo sát và dữ liệu giám sát dài hạn giúp củng cố độ tin cậy trong phân tích. Phương pháp này có ba thành phần chính: (i) cơ học kết hợp đất - chất lỏng không bão hòa, sự rời rạc đa biến trong không gian và mô phỏng tập hợp con Monte Carlo của phân tích độ tin cậy [53].

3.2. Phân tích dựa trên hình thái địa hình và thủy văn

Các quá trình thủy văn (như thấm, dòng chảy và tiến trình của áp lực nước lỗ rỗng) đóng một vai trò quan trọng trong việc hình thành lở đất. Các mô hình thủy văn mô phỏng để đánh giá tác động của quá trình thủy văn đến độ ổn định của mái dốc và khả năng xảy ra lở đất [54]. Việc tiếp cận mô hình hình thái địa hình và thủy văn (morphological and hydrological model) giúp cho việc đánh giá khả năng xảy ra trượt lở đất đề cập đến khía cạnh hình thái (liên quan đến hình dạng và đặc điểm địa hình) và thủy văn (liên quan đến dòng chảy và phân bố của nước). Do đó, mô hình tích hợp của hình thái địa hình và thủy văn là không thể thiếu trong việc lập LSM. Dựa trên việc phân tích các đặc điểm địa hình và các yếu tố liên quan đến nước, mô hình hình thái địa hình – thủy văn giúp xác định các khu vực có nguy cơ cao, từ đó, có thể

đề xuất giải pháp nhằm giảm thiểu nguy cơ lở đất nhanh chóng (Hình 2). Việc tích hợp mô hình hình thái địa hình – thủy văn trong nền tảng hệ thống thông tin địa lý (Geographic Information Systems, GIS), có sự hỗ trợ bởi kỹ thuật thống kê và MLA, nâng cao độ tin cậy và hữu dụng của LSM [8], [10], [11], [12]. Lưu ý, các điều kiện hình thái và thủy văn có thể thay đổi theo thời gian và không gian, đòi hỏi phải cập nhật thường xuyên trong phân tích. Điều này góp phần tăng độ tin cậy cho dữ liệu đầu vào của mô hình hình thái địa hình – thủy văn.



Hình 2. Sơ đồ mô hình kết hợp hình thái địa hình - thủy văn trong nền tảng GIS.

3.3. Phân tích dựa trên dữ liệu địa chất

Thông qua dữ liệu địa chất (geological data), thu được từ điều tra địa kỹ thuật tại hiện trường và (hoặc) trong phòng thí nghiệm, cung cấp dữ liệu có giá trị về tính chất đất, cấu trúc địa chất và điều kiện mặt đất; đây là những điều cần thiết để đánh giá khả năng xảy ra lở đất [55], [56]. Vì vậy, việc xem xét dữ liệu địa chất là điều không thể bỏ qua trong đánh giá khả năng xuất hiện trượt lở đất để thiết lập LSM. Việc quan sát đánh giá hiện trường có tham vấn ý kiến chuyên gia cho phép phân loại sơ bộ nhanh các vùng có địa chất tương đồng (tầng mặt và (hoặc) tầng sâu). Tuy nhiên, độ tin cậy của dữ liệu địa chất phụ thuộc vào quy trình khảo sát và thí nghiệm. Dữ liệu không chính xác có thể

dẫn đến sai lầm trong đánh giá nguy cơ trượt lở [57], [58]. Đặc biệt, điều kiện địa chất có thể thay đổi theo thời gian do các quá trình tự nhiên và hoạt động của con người, đặc biệt là địa chất bề mặt nơi có vùng canh tác sản xuất hoặc khai khoáng. Dữ liệu địa chất khi tích hợp với dữ liệu hình thái địa hình, thủy văn và sử dụng đất (landuse/landcover) tạo ra một mô hình dữ liệu toàn diện để đánh giá nguy cơ trượt lở đất.

3.4. Phân tích viễn thám và kỹ thuật GIS

Dữ liệu viễn thám (chẳng hạn như hình ảnh vệ tinh, ảnh chụp từ trên không, dữ liệu LiDAR) phản ánh đặc điểm địa hình trên bản đồ, thay đổi độ che phủ đất; độ tin cậy của dữ liệu viễn thám ảnh hưởng đến việc đánh giá khả năng xảy ra lở đất của khu vực [8], [11], [19], [33], [45], [59], [60], [61], [62], [63]. Phân tích dựa trên hệ thống thông tin địa lý (GIS) tích hợp các lớp dữ liệu này và áp dụng các kỹ thuật phân tích không gian để xác định những khu vực dễ bị ảnh hưởng. Việc ứng dụng công nghệ thông tin và không gian địa lý (như viễn thám và GIS) đã góp phần lớn vào các nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất trong những năm trở lại đây [8], [11], [19], [33], [59], [60], [62], [63], [64], [65]. Những tiến bộ gần đây và các công nghệ tiên tiến nhất góp phần cải thiện chất lượng đánh giá nguy cơ trượt lở đất như phân tích độ nhạy trượt lở đất, mô hình dòng chảy, giám sát trượt lở đất và cảnh báo sớm. Chan và cộng sự [19] đã thiết lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất dựa trên GIS sử dụng hồi quy logistic, chỉ số không ổn định (instability index, ngược lại với chỉ số ổn định – stability index) và máy vector hỗ trợ (support vector machine, SVM) thực hiện với 1001 quan sát được phân chia thành bốn cấp nguy cơ trượt lở đất (thấp, trung bình, trung bình cao, và cao). Kết quả từ nghiên cứu kết hợp này [19] cho thấy mức độ đáp ứng của mô hình (AUC) đều đạt giá trị cao (trên 70%). Tuy nhiên, kết

quả giữa việc kết hợp GIS sử dụng SVM cho thấy LSM có khuynh hướng thiên về an toàn hơn vì xác suất mức độ trượt lở cao chiếm áp đảo (trên 80%). Điều này có nghĩa là khi tính chất nguy cơ trượt lở lên cao thì tính phòng ngừa đảm bảo được gia tăng. Do đó, GIS sử dụng SVM được khuyến nghị trong việc lập LSM phục vụ quy hoạch sử dụng đất và dự án đầu tư xây dựng công trình [19].

$$[instability\ index] = 1 - [stability\ index] \quad (2)$$

Phương pháp tích hợp mô hình phân tích thứ bậc (AHP) vào GIS để thành lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất là cách tiếp cận mang tính định lượng và có độ tin cậy cao [65]. Đặc biệt, nghiên cứu kết hợp phân tích viễn thám – kỹ thuật GIS – mô hình vật lý [62], [63], tập trung vào việc đánh giá mức độ nhạy cảm với trượt lở đất bằng cách sử dụng phương pháp xác suất và phương pháp dựa trên vật lý, đánh giá dòng chảy bằng mô hình thông qua khối lượng và mô hình động, kỹ thuật giám sát tại chỗ trên mặt đất, kỹ thuật viễn thám để giám sát trượt lở đất theo thời gian thực và cảnh báo sớm trượt lở đất từ lượng mưa và ngưỡng vật lý. Với ảnh viễn thám và kỹ thuật GIS có thể phân tích được trên vùng không gian rộng trong thời gian ngắn.

Tuy nhiên, việc nhận dạng và phân loại các lớp đối tượng theo giá trị phổ khác nhau, cấu trúc, hình dạng và yếu tố không gian của lớp phủ hay sử dụng đất (landuse/landcover) đang là thách thức lớn với các nhà nghiên cứu [66]. Độ phân giải ảnh cũng tác động đến kết quả giải đoán ảnh để đánh giá trượt lở đất [67], [68]. Bảng 2 trình bày các thuận lợi và khó khăn của những phương pháp phân tích số điển hình; ngoài ra, việc kết hợp tham vấn ý kiến chuyên gia và (hoặc) sử dụng thêm phương pháp phân tích thống kê là cần thiết để thiết lập LSM. Một số phương pháp có thể phân tích trên vùng không gian rộng gặp khó khăn trong việc đánh giá các chi tiết của quá

trình trượt lở đất theo nhiều kịch bản khác nhau. Đáng chú ý, các phương pháp có khuynh hướng dựa vào kinh nghiệm phụ thuộc vào nhận định đánh giá của chuyên gia (có thể xảy ra sự chủ quan, thiên vị, hoặc lối mòn; hệ quả là, tiềm ẩn các sai lệch mang tính chủ quan). Các phương pháp đánh giá phân tích cung cấp những hiểu biết có giá trị về cơ

chế cơ bản của sự xuất hiện trượt lở đất và có thể được kết hợp với các phương pháp thực nghiệm để cải thiện độ chính xác của việc lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất. Chúng đặc biệt hữu ích để tìm hiểu sự tương tác phức tạp giữa các yếu tố khác nhau ảnh hưởng đến độ ổn định của mái dốc.

Bảng 2. Các thuận lợi và khó khăn của những phương pháp phân tích số điển hình trong việc thiết lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất.

Phương pháp phân tích số	Thuận lợi	Khó khăn	Kết hợp để lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất			
			Tham vấn chuyên gia		Phân tích thống kê	
			Bắt buộc	Nên xem xét	Bắt buộc	Nên xem xét
Phân tích bằng mô hình mô phỏng	Diễn họa và đánh giá được chi tiết quá trình trượt lở đất theo nhiều kịch bản khác nhau.	Hạn chế về số điểm điển hình trên thực tế nên việc áp dụng lên vùng không gian rộng sẽ tốn kém về chi phí và thời gian phân tích. Không thể thiết lập ngay LSM.		x	x	
Phân tích dựa trên hình thái địa hình và thủy văn	Có thể phân tích được trên vùng không gian rộng. Tập trung đánh giá đặc điểm bên ngoài của khu vực (hình thái địa hình và thủy văn).	Không chi tiết hóa được quá trình trượt lở trong nhiều kịch bản khi các yếu tố ảnh hưởng thay đổi. Phụ thuộc vào nhận định đánh giá của chuyên gia.	x			x
Phân tích dựa trên dữ liệu địa chất	Có thể phân tích trên vùng không gian rộng. Tập trung đánh giá được bên trong của khu vực (địa chất).	Không chi tiết hóa được quá trình trượt lở trong nhiều kịch bản khi các yếu tố ảnh hưởng thay đổi. Phụ thuộc vào nhận định đánh giá của chuyên gia.	x			x
Phân tích viễn thám và kỹ thuật GIS	Có thể phân tích trên vùng không gian rộng trong thời gian ngắn.	Không chi tiết hóa được quá trình trượt lở trong nhiều kịch bản khi các yếu tố ảnh hưởng thay đổi. Phụ thuộc vào dữ liệu viễn thám (ví dụ, độ chính xác, chuỗi thời gian).	x			x

4. Phương pháp phân tích dựa trên tính tổn thương

4.1. Chỉ số nguy cơ trượt lở đất

Chỉ số nguy cơ trượt lở đất (Landslide

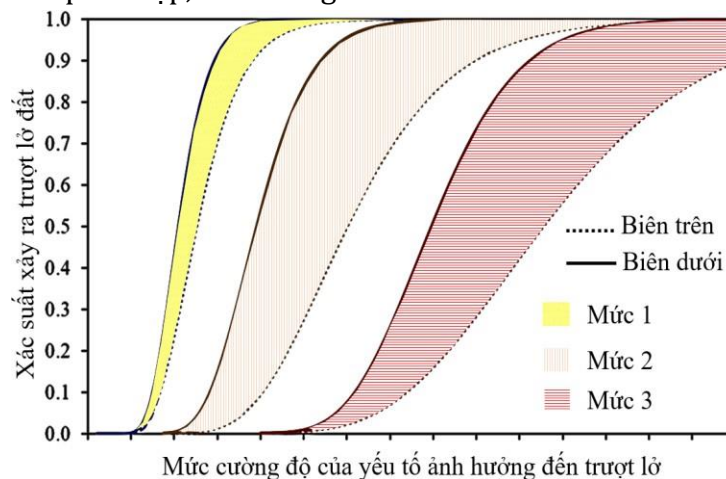
Susceptibility Index, LSI) đã được sử dụng như một thước đo định lượng dùng để đánh giá và lập bản đồ khả năng xảy ra trượt lở đất trong một khu vực cụ thể [69], [70], [71], [72]. LSI có thể được lấy từ nhiều yếu tố khác

nhau ảnh hưởng đến trượt lở đất (ví dụ như địa hình, địa chất, thủy văn, sử dụng đất và độ che phủ). LSI có độ tin cậy lớn, việc dự đoán nguy cơ trượt lở đất có độ tin cậy cao [69], [70]. Sử dụng quy trình phân tích độ tin cậy ổn định mái dốc có xét đến các yếu tố ngẫu nhiên được dựa trên LSI.

4.2. Đường cong tích lũy xác suất xảy ra trượt lở đất

Một số nhà khoa học nỗ lực nghiên cứu đường cong tích lũy xác suất nguy cơ trượt lở đất (fragility curve of landslide hazard probability) [57], [60], [72], [73]. Đường cong tích lũy xác suất xảy ra trượt lở đất hỗ trợ dự báo một cách định lượng (theo xác suất) các tai biến địa chất trượt lở, đặc biệt đối với điều kiện độ dốc phức tạp, đất không

bão hòa phải chịu mưa cực đoan. Xây dựng đường cong xác suất rủi ro bằng phân tích đa dải khả năng tối đa xảy ra trượt lở cho từng khu vực (maximum likelihood estimation) có khuynh hướng thiên về an toàn có thể xem xét để xây dựng đường cong xác suất xảy ra trượt lở đất [29], [38]. Hình 3 đưa ra một ví dụ minh họa đường cong tích lũy xác suất xảy ra trượt lở đất theo nhiều cấp độ trượt lở. Bằng việc nâng cấp phương pháp phân tích có tính định lượng, dựa trên lý thuyết xác suất và giá trị của tham số được ước tính bởi phương pháp ước lượng độ tin cậy tối đa, đường cong tích lũy xác suất xảy ra trượt lở đi sâu hơn về ảnh hưởng của các tham số đến cơ chế trượt lở đất trong việc dự báo nguy cơ trượt lở so với thống kê SVM [42].



Hình 3. Ví dụ đường cong tích lũy xác suất xảy ra trượt lở đất theo nhiều cấp độ trượt lở đất.

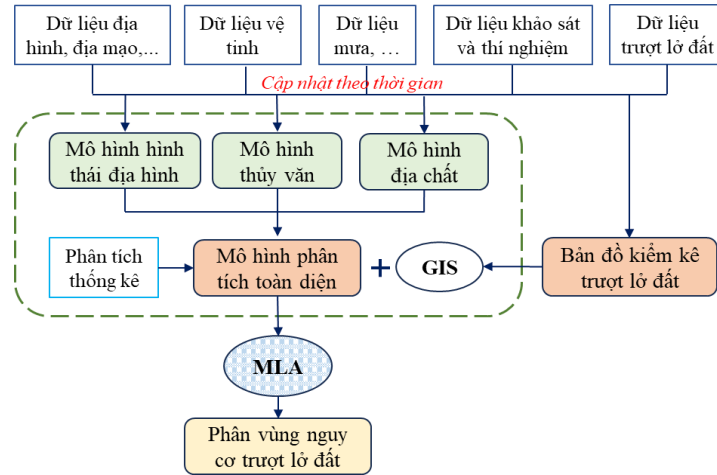
5. Yêu cầu và thách thức

Bản đồ nguy cơ trượt lở đất (landslide susceptibility mapping, LSM) đã góp phần vào việc hỗ trợ các quốc gia quản lý rủi ro và lập kế hoạch sử dụng đất tại những vùng dễ bị trượt lở [5], [7], [8], [9]. Nhìn chung, phương pháp phổ biến nhất để lập LSM là phương pháp phân tích số có xét đến quyết định đa tiêu chí (bao gồm việc sử dụng nhiều tiêu chí khác nhau như góc dốc, loại đất, thảm thực vật và cường độ mưa để đánh giá khả năng xảy ra lở đất của một khu vực). Các phương pháp khác bao gồm đánh giá thống

kê hay kiểm kê trượt lở đất từ thực địa hoặc kết hợp hình ảnh vệ tinh (có thể cung cấp cái nhìn tổng quan nhanh chóng về các khu vực có thể xảy ra vấn đề) và lập bản đồ nguy cơ trượt lở động bằng cách sử dụng hình ảnh radar hoặc landsat khẩu độ tổng hợp trên không gian.

Mặc dù, vấn đề trượt lở đất được quan tâm và chú ý bởi nhiều nhà khoa học trên thế giới; việc đẩy mạnh các nghiên cứu để tìm cách cải thiện độ chính xác và tính hiệu quả của thiết lập LSM cần được chú trọng hơn. Việc phân tích dữ liệu lớn dựa trên học máy

có thể giúp sự kết hợp giữa phương pháp định lượng phân tích và (hoặc) xem xét đến cơ chế trượt lở và phương pháp định tính hiệu quả [5], [17], [38], [74]. Từ phân tích trên, có thể rút ra rằng nhiều phương pháp đánh giá nguy cơ trượt lở đất được sử dụng để xác định và ước tính khả năng xảy ra trượt lở đất, cũng như lập LSM. Một quy trình thực hiện phương pháp tích hợp được đề xuất như



Hình 4. Sơ đồ phân tích thiết lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất.

Về mặt phân tích, vẫn còn một số vấn đề đặc biệt cần giải quyết bằng các chiến lược phân tích phù hợp. Phương pháp đánh giá thực nghiệm cho thấy vấn đề trượt lở thực tế. Dữ liệu thực nghiệm có thể không đảm bảo tính liên tục hoặc thậm chí có độ tin cậy chưa cao do phụ thuộc vào ý kiến đánh giá của chuyên gia dưới các góc nhìn không nhất quán (thiên về định tính), điều này dẫn đến nguy cơ sai lệch cao trong việc nhận định khả năng trượt lở. Ngoài ra, phương pháp đánh giá thực nghiệm không bao hàm được các yếu tố mang tính ngẫu nhiên không chắc chắn, thiếu tính chất định lượng và bản chất cơ chế trượt lở. Ngược lại, phương pháp phân tích số có thể xem xét đến các yếu tố ngẫu nhiên, làm rõ bản chất cơ chế trượt lở hơn. Tuy nhiên, cần chú ý đến tính phản ánh thực tế và nhạy cảm của mô hình mô phỏng dùng để phân tích. Đặc biệt, có thể tốn nhiều thời gian và chi phí phân tích khi tiếp cận phân tích số để xây dựng LSM. Do đó, cần

Hình 4. Phương pháp tích hợp từ các phương pháp kể trên (hybrid method) được sử dụng nhằm phát huy ưu điểm và hạn chế nhược điểm của từng nhóm phương pháp riêng lẻ [42]. Phương pháp tích hợp cố gắng luận giải vấn đề trượt lở dựa trên phát huy tối đa nguồn cơ sở dữ liệu hiện có, và xét đến dữ liệu được cập nhật trong tương lai [42].

thiết kết hợp phương pháp tiếp cận đánh giá và lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất, xem xét đến các yếu tố ảnh hưởng. Một kiến nghị được trình bày trong Bảng 3.

Đối với các yếu tố ảnh hưởng đến bài toán trượt lở đất, nếu căn cứ tính chất ổn định của yếu tố theo thời gian có thể chia làm hai nhóm yếu tố: (i) yếu tố nội tại (có tính chất tĩnh hay gần tĩnh) và (ii) yếu tố bên ngoài (có tính chất biến động tức là thay đổi dựa vào thời gian ngắn có thể không theo quy luật). Yếu tố nội tại chủ đạo bao gồm hình thái bề mặt; cấu trúc địa chất, địa tầng; tính chất vật lý và ứng xử của đất; cơ chế thủy lực của mái dốc. Yếu tố bên ngoài chủ đạo bao gồm thay đổi thời tiết khí hậu (tác động đến điều kiện thủy động lực trong đất như áp lực nước lỗ rỗng); hoạt động của con người (gián tiếp tác động đến địa chất, hoặc thay đổi địa hình, địa mạo, trực tiếp gia tăng thành phần lực gây trượt lở); ảnh hưởng của động đất; sự thay đổi hình thái tự nhiên. Vì vậy, LSM cần xem

xét theo thời gian vì có thể yếu tố động thay đổi phải cập nhật LSM. Những LSM đã thiết lập trước đây cần đánh giá và nâng cấp để sử dụng có độ tin cậy cao theo mức độ nhu cầu của cơ quan quản lý; việc đánh giá nâng cấp này có thể kết hợp phân tích thống kê.

Bảng 3. Các tham số được khuyến nghị sử dụng để đánh giá và lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất.

Tham số ảnh hưởng đến độ ổn định mái dốc	Phương pháp tiếp cận đánh giá và lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất					
	Đánh giá thực nghiệm		Đánh giá dựa trên ý kiến chuyên gia		Đánh giá phân tích số	
	Bắt buộc	Nên xem xét	Bắt buộc	Nên xem xét	Bắt buộc	Nên xem xét
Dữ liệu quan sát từ kiểm kê trượt lở	x		x			x
Độ dốc địa hình		x	x		x	
Cấu trúc và thuộc tính địa chất	x		x		x	
Thuộc tính tầng phủ thực vật	x			x		x
Cơ chế thủy lực, thủy văn		x	x		x	
Phụ tải phát sinh (động đất, hoạt động của con người)		x		x	x	
Khí hậu, mưa	x			x	x	
Mức độ phong hóa đất	x			x		x

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Tác giả tuyên bố không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Nguyen Van Toan. *Faculty of Civil Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City*
nguyenvantoan@iuh.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] Japan International Cooperation Agency, "Natural disaster risk assessment and area business continuity plan formulation for industrial agglomerated areas in the ASEAN Region - Country Report Vietnam," AHA Centre, JICA, Tokyo, Japan, 2015.
- [2] L. Zhang, X. Tang, and J. Yang, "Rainfall-induced flowslides of granular soil slopes: Insights from grain-scale modeling," *Eng. Geol.*, vol. 323, 2033, Art. no. 107223, doi: [10.1016/j.enggeo.2023.107223](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107223).
- [3] UNICEF, "Viet Nam Typhoon Yagi Situation Reports," 2024.
- [4] H. Fu, W. Chen, and J. Fu, "Overview of research," in *Rock Mechanics and Engineering*, H. Fu, W. Chen, and J. Fu Eds., Elsevier, 2021, ch. 1, pp. 1-9.
- [5] W. Azemeraw, "Landslide Inventory, Susceptibility, Hazard and Risk Mapping," in *Landslides*, Z. Yuanzhi and C. Qiuming, Eds., Rijeka, Croatia: IntechOpen, 2021.
- [6] K. Gaidzik and M. T. Ramírez-Herrera, "The importance of input data on landslide susceptibility mapping," *Scientific Reports*, vol. 11, 2021, Art. no. 19334, doi: [10.1038/s41598-021-98830-y](https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y).
- [7] H. Shahabi et al., "Landslide susceptibility mapping in a mountainous area using machine learning algorithms," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 12, 2023, Art. no. 3112, doi: [10.3390/rs15123112](https://doi.org/10.3390/rs15123112).

- [8] A. Addis, "GIS-Based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and shannon entropy models in Dejen District, Northwestern Ethiopia," *Journal of Engineering*, 2023, Art. no. 1062388, doi: [10.1155/2023/1062388](https://doi.org/10.1155/2023/1062388).
- [9] T. Trinh et al., "A comparative analysis of weight-based machine learning methods for landslide susceptibility mapping in Ha Giang area," *Big Earth Data*, vol. 7, no. 4, pp. 1005-1034, 2023, doi: [10.1080/20964471.2022.2043520](https://doi.org/10.1080/20964471.2022.2043520).
- [10] H. G. Abdo, "Assessment of landslide susceptibility zonation using frequency ratio and statistical index: A case study of Al-Fawar basin, Tartous, Syria," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, pp. 2599-2618, 2022, doi: [10.1007/s13762-021-03322-1](https://doi.org/10.1007/s13762-021-03322-1).
- [11] P. Amatya, D. Kirschbaum, and T. Stanley, "Rainfall-induced landslide inventories for Lower Mekong based on Planet imagery and a semi-automatic mapping method," *Geosci. Data J.*, vol. 9, no. 2, pp. 315-327, Nov. 2022, doi: [10.1002/gdj3.145](https://doi.org/10.1002/gdj3.145).
- [12] A. Addis, "Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and Bivariate Statistical Models in Chemoga Watershed, Ethiopia," *Advances in Civil Engineering*, 2024, doi: [10.1155/2024/6616269](https://doi.org/10.1155/2024/6616269).
- [13] H. Fu, W. Chen, and J. Fu, "Landslide and rockfall prediction technology," in *Rock Mechanics and Engineering*, H. Fu, W. Chen, and J. Fu, Eds., Elsevier, 2021, ch. 9, pp. 245-307.
- [14] V. Vakhshoori and M. Zare, "Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 7, no. 5, pp. 1731-1752, 2016, doi: [10.1080/19475705.2016.1144655](https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1144655).
- [15] M. Moharrami and M. Jelokhani-Niaraki, "Landslide susceptibility mapping using statistical and machine learning models (case study: Austria)," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 79-94, 2023, doi: [10.61186/jgst.13.2.79](https://doi.org/10.61186/jgst.13.2.79).
- [16] M. Ado et al., "Landslide susceptibility mapping using machine learning: A literature survey," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 13, 2022, Art. no. 3029, doi: [10.3390/rs14133029](https://doi.org/10.3390/rs14133029).
- [17] N. Sharma, M. Saharia, and G. V. Ramana, "High resolution landslide susceptibility mapping using ensemble machine learning and geospatial big data," *CATENA*, vol. 235, Feb. 2024, Art. no. 107653, doi: [10.1016/j.catena.2023.107653](https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107653).
- [18] T. V. Phong, H. -B. Ly, P. T. Trinh, I. Prakash, and D. T. Hoan, "Landslide susceptibility mapping using Forest by Penalizing Attributes (FPA) algorithm based machine learning approach," *Vietnam Journal of Earth Sciences*, vol. 42, no. 3, pp. 237-246, 2020, doi: [10.15625/0866-7187/42/3/15047](https://doi.org/10.15625/0866-7187/42/3/15047).
- [19] H. -C. Chan, Y. -C. Chen, J. -T. Lee, and Y. -T. Wen, "GIS-Based landslide susceptibility mapping using logistic regression, instability index, and support vector machine: Case study of the Jingshan River, Taiwan," *Journal of Marine Science Technology*, vol. 29, no. 3, 2021, Art. no. 5, doi: [10.51400/2709-6998.1434](https://doi.org/10.51400/2709-6998.1434).
- [20] M. S. Chowdhury, "A review on landslide susceptibility mapping research in Bangladesh," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, Jul. 2023, Art. no. e17972, doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e17972](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17972).
- [21] A. Wubalem and M. Meten, "Landslide susceptibility mapping using information value and logistic regression models in Goncha Siso Eneses area, northwestern Ethiopia," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, 2020, Art. no. 807, doi: [10.1007/s42452-020-2563-0](https://doi.org/10.1007/s42452-020-2563-0).
- [22] C. Kincal and H. Kayhan, "A combined method for preparation of landslide susceptibility map in Izmir (Türkiye)," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 18, 2022, Art. no. 9029, doi: [10.3390/app12189029](https://doi.org/10.3390/app12189029).
- [23] A. S. Bacha, M. Shafique, and H. van der Werff, "Landslide inventory and susceptibility modelling using geospatial tools, in Hunza-Nagar valley, northern Pakistan," *J. Mt. Sci.*, vol. 15, pp. 1354-1370, 2018, doi: [10.1007/s11629-017-4697-0](https://doi.org/10.1007/s11629-017-4697-0).
- [24] D. Gerzsenyi and G. Albert, "Landslide inventory validation and susceptibility mapping in the Gerecse Hills, Hungary," *Geo-spatial Information Science*, vol. 24, no. 3, pp. 498-508, 2021, doi: [10.1080/10095020.2020.1870872](https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1870872).
- [25] A. Wubalem, "Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia," *Geoenviron. Disasters*, vol. 8, 2021, Art. no. 1, doi: [10.1186/s40677-020-00170-y](https://doi.org/10.1186/s40677-020-00170-y).
- [26] X. Sun et al., "Landslide susceptibility mapping using logistic regression analysis along the Jinsha River and its tributaries close to Derong and Deqin

- County, Southwestern China," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 7, no. 11, 2018, Art. no. 438, doi: [10.3390/ijgi7110438](https://doi.org/10.3390/ijgi7110438).
- [27] H. Hemasinghe, R. S. S. Rangali, N. L. Deshapriya, and L. Samarakoon, "Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in Badulla District, Sri Lanka)," *Procedia Eng.*, vol. 212, pp. 1046-1053, 2018, doi: [10.1016/j.proeng.2018.01.135](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.135).
- [28] W. Chen et al., "Landslide susceptibility modeling based on GIS and novel bagging-based kernel logistic regression," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, 2018, Art. no. 2540, doi: [10.3390/app8122540](https://doi.org/10.3390/app8122540).
- [29] S. Boussouf, T. Fernández, and A. B. Hart, "Landslide susceptibility mapping using maximum entropy (MaxEnt) and geographically weighted logistic regression (GWLRL) models in the Río Aguas catchment (Almería, SE Spain)," *Nat. Hazards*, vol. 117, pp. 207-235, 2023, doi: [10.1007/s11069-023-05857-7](https://doi.org/10.1007/s11069-023-05857-7).
- [30] I. Obda et al., "Landslide susceptibility mapping using GIS Matrix Method and Frequency Ratio, application in the marly context of Moulay Yacoub Region, Morocco," *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. 195, no. 1, 2024, Art. no. 1, doi: [10.1051/bsgf/2023016](https://doi.org/10.1051/bsgf/2023016).
- [31] D. Sun et al., "Landslide susceptibility mapping based on interpretable machine learning from the perspective of geomorphological differentiation," *Land*, vol. 12, no. 5, 2023, Art. no. 1018, doi: [10.3390/land12051018](https://doi.org/10.3390/land12051018).
- [32] T. A. Tuan, T. T. Tam, P. V. Hong, and N. T. A. Nguyet, "Landslide susceptibility mapping based on the Weights of Evidence model for mountainous areas of Quang Nam province, Vietnam," *Journal of Hydro-meteorology*, vol. 17, pp. 31-45, 2023, doi: [10.36335/VNJHM.2023\(17\).31-45](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023(17).31-45).
- [33] T. Mersha and M. Meten, "GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia," *Geoenviron. Disasters*, vol. 7, 2020, Art. no. 20, doi: [10.1186/s40677-020-00155-x](https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x).
- [34] X. Pan, H. Nakamura, T. Nozaki, and X. Huang, "A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis," *Journal of the Japan Landslide Society*, vol. 45, no. 3, pp. 187-195, 2008, doi: [10.3313/jls.45.187](https://doi.org/10.3313/jls.45.187).
- [35] N. Santacana, B. Baeza, J. Corominas, A. De Paz, and J. Marturiá, "A GIS-Based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain)," *Nat. Hazards*, vol. 30, pp. 281-295, 2003, doi: [10.1023/B:NHAZ.0000007169.28860.80](https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007169.28860.80).
- [36] N. Nurwatik, M. H. Ummah, A. B. Cahyono, M. R. Darminto, and J. -H. Hong, "A comparison study of landslide susceptibility spatial modeling using machine learning," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 11, no. 12, 2022, Art. no. 602, doi: [10.3390/ijgi11120602](https://doi.org/10.3390/ijgi11120602).
- [37] C. Baeza, N. Lantada, and S. Amorim, "Statistical and spatial analysis of landslide susceptibility maps with different classification systems," *Environ. Earth Sci.*, vol. 75, 2016, Art. no. 1318, doi: [10.1007/s12665-016-6124-1](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6124-1).
- [38] G. Agboola, L. H. Beni, T. Elbayoumi, and G. Thompson, "Optimizing landslide susceptibility mapping using machine learning and geospatial techniques," *Ecol. Inform.*, vol. 81, Jul. 2024, Art. no. 102583, doi: [10.1016/j.ecoinf.2024.102583](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102583).
- [39] T. Pareek, "Analysing the posterior predictive capability of landslide susceptibility maps," M.S. Thesis, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, Enschede, Holland, 2022.
- [40] X. Wei et al., "Comparison of hybrid data-driven and physical models for landslide susceptibility mapping at regional scales," *Acta Geotech.*, vol. 18, pp. 4453-4476, 2023, doi: [10.1007/s11440-023-01841-4](https://doi.org/10.1007/s11440-023-01841-4).
- [41] A. Juyal and S. Sharma, "A Study of Landslide Susceptibility Mapping using Machine Learning Approach," in *2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*, Tirunelveli, India, 2021, pp. 1523-1528.
- [42] Y. Huang and L. Zhao, "Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines," *CATENA*, vol. 165, pp. 520-529, Jun. 2018, doi: [10.1016/j.catena.2018.03.003](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.003).
- [43] M. Sheng et al., "Landslide susceptibility prediction based on frequency ratio method and C5.0 decision tree model," *Front. Earth Sci.*, vol. 10, 2022, doi: [10.3389/feart.2022.918386](https://doi.org/10.3389/feart.2022.918386).
- [44] K. Taalab, T. Cheng, and Y. Zhang, "Mapping landslide susceptibility and types using Random

- Forest," *Big Earth Data*, vol. 2, no. 2, pp. 159-178, 2018, doi: [10.1080/20964471.2018.1472392](https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1472392).
- [45] F. Islam et al., "Landslide susceptibility mapping (LSM) of Swat District, Hindu Kush Himalayan region of Pakistan, using GIS-based bivariate modeling," *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, 2022, doi: [10.3389/fenvs.2022.1027423](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1027423).
- [46] Bentley. *GeoStudio SLOPE/W manuals*. (2018). Accessed: Apr. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.bentley.com/software/geotechnical-engineering/>
- [47] Bentley. *Plaxis 2D/3D manuals*. (2020). Accessed: Apr. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.bentley.com/software/geotechnical-engineering/>
- [48] Z. Qingyun, Z. Mingxin, and H. Dan, "Numerical simulation of impact and entrainment behaviors of debris flow by using SPH-DEM-FEM coupling method," *Open Geosciences*, vol. 14, no. 1, pp. 1020-1047, 2022, doi: [10.1515/geo-2022-0407](https://doi.org/10.1515/geo-2022-0407).
- [49] L. N. Thanh and F. De Smedt, "Slope stability analysis using a physically based model: a case study from A Luoi district in Thua Thien-Hue Province, Vietnam," *Landslides*, vol. 11, pp. 897-907, 2014, doi: [10.1007/s10346-013-0437-x](https://doi.org/10.1007/s10346-013-0437-x).
- [50] J. Thomas, M. Gupta, P. K. Srivastava, and G. P. Petropoulos, "Assessment of a dynamic physically based slope stability model to evaluate timing and distribution of rainfall-induced shallow landslides," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 12, no. 3, 2023, Art. no. 105, doi: [10.3390/ijgi12030105](https://doi.org/10.3390/ijgi12030105).
- [51] N. V. Toán, "Mô hình số phân tích ổn định mái dốc theo lý thuyết độ tin cậy bằng phần mềm Geostudio," *Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, số 55, tr. 167-173, 11. 2016.
- [52] P. Xiao et al., "A Bayesian Network-Based Inhibition Model of the Rainstorm-Landslide-Debris Flow Disaster Chain in Mountainous Areas: The Case of the Greater Bay Area, China," *Water*, vol. 15, no. 17, 2023, Art. no. 3124, doi: [10.3390/w15173124](https://doi.org/10.3390/w15173124).
- [53] M. L. Huang, D. A. Sun, C. H. Wang, and Y. Keleta, "Reliability analysis of unsaturated soil slope stability using spatial random field-based Bayesian method," *Landslides*, vol. 18, pp. 1177-1189, 2021, doi: [10.1007/s10346-020-01525-0](https://doi.org/10.1007/s10346-020-01525-0).
- [54] I. Sonker, J. N. Tripathi, and Swarnim, "Landslide susceptibility mapping using morphological and hydrological parameters in Sikkim Himalaya: frequency ratio model and geospatial technologies," *Nat. Hazards*, vol. 120, pp. 6797-6832, 2024, doi: [10.1007/s11069-024-06491-7](https://doi.org/10.1007/s11069-024-06491-7).
- [55] M. Krkač et al., "Impact of Input Data on the Quality of the Landslide Susceptibility Large-Scale Maps: A Case Study from NW Croatia," in *Progress in Landslide Research and Technology*, I. Alcántara-Ayala et al., Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, vol. 2, no. 1, 2023, pp. 135-146.
- [56] J. B. Woodard et al., "Mapping landslide susceptibility over large regions with limited data," *JGR Earth Surface*, vol. 128, no. 5, May 2023, Art. no. e2022JF006810, doi: [10.1029/2022JF006810](https://doi.org/10.1029/2022JF006810).
- [57] P. Fleuchaus, P. Blum, M. Wilde, B. Terhorst, and C. Butscher, "Retrospective evaluation of landslide susceptibility maps and review of validation practice," *Environ. Earth Sci.*, vol. 80, 2021, Art. no. 485, doi: [10.1007/s12665-021-09770-9](https://doi.org/10.1007/s12665-021-09770-9).
- [58] P. Lima, S. Steger, and T. Glade, "Counteracting flawed landslide data in statistically based landslide susceptibility modelling for very large areas: a national-scale assessment for Austria," *Landslides*, vol. 18, pp. 3531-3546, 2021, doi: [10.1007/s10346-021-01693-7](https://doi.org/10.1007/s10346-021-01693-7).
- [59] P. T. T. Thuy, L. T. T. Ha, V. N. Phan, and, "Application of the GIS and R program for landslide susceptibility mapping: A case study in Van Yen, Yen Bai, Vietnam," *Science on Natural Resources and Environment*, no. 43, pp. 104-113, 2022.
- [60] D. Thapa and B. P. Bhandari, "GIS-Based frequency ratio method for identification of potential landslide susceptible area in the Siwalik zone of Chatara-Barahakshetra section, Nepal," *Open J. Geol.*, vol. 9, no. 12, 2019, doi: [10.4236/ojg.2019.912096](https://doi.org/10.4236/ojg.2019.912096).
- [61] M. S. Chowdhury et al., "GIS-based landslide susceptibility mapping using logistic regression, random forest and decision and regression tree models in Chattogram District, Bangladesh," *Heliyon*, vol. 10, no. 1, 2024, Art. no. e23424, doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e23424](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23424).
- [62] H. Shahabi and M. Hashim, "Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment," *Sci. Rep.*, vol. 5, 2015, Art. no. 9899, doi: [10.1038/srep09899](https://doi.org/10.1038/srep09899).

- [63] I. Sonker, J. N. Tripathi, and Swarnim, "Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio method in Sikkim Himalaya," *Quaternary Science Advances*, vol. 8, Oct. 2022, Art. no. 100067, doi: [10.1016/j.qsa.2022.100067](https://doi.org/10.1016/j.qsa.2022.100067).
- [64] D. Q. Thanh et al., "GIS based frequency ratio method for landslide susceptibility mapping at Da Lat City, Lam Dong province, Vietnam," *Vietnam Journal of Earth Sciences*, vol. 42, no. 1, pp. 55-66, 2020, doi: [10.15625/0866-7187/42/1/14758](https://doi.org/10.15625/0866-7187/42/1/14758).
- [65] N. Thám, N. Đ. Độ, và U. Đ. Khanh, "Xây dựng bản đồ nguy cơ trượt lở đất tỉnh Quảng Trị bằng phương pháp tích hợp mô hình phân tích thứ bậc (AHP) vào GIS," *Tạp chí Khoa học, Đại học Huế, tập 74B, số 5, tr. 143-155, 2012*.
- [66] L. T. Pham et al., "Establishment of land cover map using object-oriented classification method for VNREDSat-1 data," *Journal of Mining and Earth Sciences*, vol. 61, no. 2, pp. 135-145, Apr. 2020, doi: [10.46326/JMES.2020.61\(2\).15](https://doi.org/10.46326/JMES.2020.61(2).15).
- [67] F. Huang, Z. Teng, Z. Guo, F. Catani, and J. Huang, "Uncertainties of landslide susceptibility prediction: Influences of different spatial resolutions, machine learning models and proportions of training and testing dataset," *Rock Mechanics Bulletin*, vol. 2, no. 1, Jan. 2023, Art. no. 100028, doi: [10.1016/j.rockmb.2023.100028](https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2023.100028).
- [68] Y. Tian, C. XiaO, Y. Liu, and L. Wu, "Effects of raster resolution on landslide susceptibility mapping: A case study of Shenzhen," *Sci. China Ser. E-Technol. Sci.*, vol. 51 (Suppl 2), pp. 188-198, 2008, doi: [10.1007/s11431-008-6009-y](https://doi.org/10.1007/s11431-008-6009-y).
- [69] P. Goyes-Peñafiel and A. Hernandez-Rojas, "Landslide susceptibility index based on the integration of logistic regression and weights of evidence: A case study in Popayan, Colombia," *Eng. Geol.*, vol. 280, Jan. 2021, Art. no. 105958, doi: [10.1016/j.enggeo.2020.105958](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105958).
- [70] I. Cantarino, M. A. Carrion, V. Martínez-Ibáñez, and E. Gielen, "Improving Landslide Susceptibility Assessment through Frequency Ratio and Classification Methods-Case Study of Valencia Region (Spain)," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 8, 2023, Art. no. 5146, doi: [10.3390/app13085146](https://doi.org/10.3390/app13085146).
- [71] C. Chalkias, M. Ferentinou, and C. Polykretis, "GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping on the Peloponnese Peninsula, Greece," *Geosciences*, vol. 4, no. 3, pp. 176-190, 2014, doi: [10.3390/geosciences4030176](https://doi.org/10.3390/geosciences4030176).
- [72] A. Arabameri, B. Pradhan, K. Rezaei, and C.-W. Lee, "Assessment of Landslide Susceptibility Using Statistical- and Artificial Intelligence-Based FR-RF Integrated Model and Multiresolution DEMs," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 9, 2019, Art. no. 999, doi: [10.3390/rs11090999](https://doi.org/10.3390/rs11090999).
- [73] M. Del Soldato et al., "Landslide-Induced Damage Probability Estimation Coupling InSAR and Field Survey Data by Fragility Curves," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 12, 2019, Art. no. 1486, doi: [10.3390/rs11121486](https://doi.org/10.3390/rs11121486).
- [74] M. Azarafza, M. Azarafza, H. Akgün, P. M. Atkinson, and R. Derakhshani, "Deep learning-based landslide susceptibility mapping," *Sci. Rep.*, vol. 11, 2021, Art. no. 24112, doi: [10.1038/s41598-021-03585-1](https://doi.org/10.1038/s41598-021-03585-1).