Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 173–187

BỐ TRÍ RÃNH THOÁT NƯỚC MẶT BÁM ĐỊA HÌNH TRÊN MÔ HÌNH SỐ ĐỘ CAO NHẰM GIẢM NGUY CƠ MẤT ỔN ĐỊNH MÁI DỐC KHI MƯA

Phạm Việt Anh[a,*], Ngô Thị Thanh Tươi[b], Nguyễn Phương Thúy[b]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*
[b]*Khoa Kinh tế và Quản lý Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 11/9/2026, Sửa xong 29/10/2026, Chấp nhận đăng 02/11/2026

Tóm tắt

Các giải pháp ổn định mái dốc hiện nay chủ yếu là gia cố cơ học, tốn kém và khó triển khai; kiểm soát nước chảy tràn bề mặt, tác động trực tiếp vào tác nhân gây mất ổn định, hiếm khi được thiết kế có hệ thống. Bài báo đề xuất giải pháp thu gom nước mặt bằng mạng rãnh bám địa hình và dùng mô hình số để kiểm tra hiệu quả. Quy trình gồm tạo tự động mạng rãnh (rãnh ngang theo đồng mức, rãnh dọc theo tụ thủy) từ mô hình số độ cao (DEM), mô hình dòng chảy tràn liên kết rãnh DCOF tính chiều dài chảy tràn tích lũy L_{up}, ứng suất cắt τ và thời gian tập trung nước t_c, và tối ưu hóa Pareto giữa tỷ lệ diện tích có τ vượt ngưỡng xói (f_1) và tổng chiều dài rãnh (f_2) trên 25 tổ hợp khoảng cách cao độ Δh và ngưỡng diện tích tụ nước acc_{thr}. Giải pháp được kiểm nghiệm trên mái taluy tại phường Cam Đường, tỉnh Lào Cai (5,0 ha), mưa 90–180 mm/h. Tại 180 mm/h, phương án có f_1 nhỏ nhất (KB2) giảm L_{up} cực đại 71,4% (185,9 xuống 53,2 m), tỷ lệ diện tích vượt ngưỡng từ 63,0% xuống 14,4% và thời gian tập trung nước từ 0,9 xuống 0,4 phút: nước trên mái ít hơn, tồn tại ngắn hơn, xói giảm rõ rệt. Khoảng cách cao độ giữa các rãnh ngang chi phối hiệu quả. Giải pháp không trực tiếp làm tăng hệ số an toàn; nghiên cứu chưa phân tích thấm.

Từ khoá: ổn định mái dốc; thoát nước mặt; bố trí rãnh bám địa hình; mô hình số độ cao; tối ưu hóa Pareto; dòng chảy tràn liên kết rãnh.

TERRAIN-FOLLOWING SURFACE DRAINAGE DITCH LAYOUT ON DIGITAL ELEVATION MODELS FOR REDUCING RAINFALL-INDUCED SLOPE INSTABILITY RISK

Abstract

Current slope stabilization practice focuses on mechanical reinforcement, which is costly and difficult to implement, while surface water control, which acts directly on the cause of instability, is rarely designed systematically. This paper proposes collecting surface water with a terrain-following ditch network and assesses its effectiveness by numerical modeling. The procedure combines automatic generation of the network (contour and drainage-line ditches) from a digital elevation model (DEM), a ditch-coupled overland flow model (DCOF) computing accumulated overland flow length L_{up}, hydraulic shear stress τ and concentration time t_c, and two-objective Pareto optimization between the fraction of slope area with τ above the permissible value (f_1) and total ditch length (f_2) over 25 combinations of elevation spacing Δh and drainage-area threshold acc_{thr}. It is applied to the naturally vegetated slope CT05 in Lào Cai Province (5.0 ha) under rainfall of 90 to 180 mm/h. At 180 mm/h, the arrangement with the smallest f_1 (KB2) reduces the maximum overland flow length by 71.4% (185.9 to 53.2 m), the area fraction above the permissible shear stress from 63.0% to 14.4%, and mean concentration time from 0.9 to 0.4 minutes: less water stays on the slope for a shorter time and erosion hazard drops markedly. The spacing of contour ditches governs the result. The solution does not directly raise the factor of safety; infiltration is not analyzed.

Keywords: slope stability; surface drainage; terrain-following ditch layout; digital elevation model; Pareto optimization; ditch-coupled overland flow.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-13 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Mất ổn định mái dốc do mưa là dạng sự cố phổ biến tại các khu vực đồi núi, trong đó nước được thừa nhận rộng rãi là tác nhân kích hoạt chính thông qua hai cơ chế song song. Cơ chế thứ nhất là

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* anhpv@huce.edu.vn (Anh, P. V.)

thấm: nước mưa thấm vào trong đất làm tăng áp lực nước lỗ rỗng, giảm ứng suất hữu hiệu và triệt tiêu lực hút dính của đất không bão hòa [1], dẫn tới suy giảm nhanh cường độ chống cắt và có thể kích hoạt trượt sâu. Cơ chế thứ hai là dòng chảy tràn trên mặt, gây xói bề mặt và hình thành các rãnh xói tập trung, đồng thời mở đường cho thấm ưu tiên vào các vị trí đã bị phá vỡ lớp phủ [2]. Do đó, nguyên tắc chung để giảm nguy cơ mất ổn định mái là hạn chế lượng nước tiếp xúc với đất và rút ngắn thời gian tiếp xúc đó.

Trong thực hành thiết kế hiện nay, các giải pháp ổn định mái dốc có thể chia thành hai nhóm chính. Nhóm giải pháp gia cố cơ học (như neo đất, neo đá, cọc chống trượt, tường chắn, khung dầm bê tông, đinh đất) trực tiếp tăng khả năng chống trượt và chiếm vị trí chủ đạo cả về khối lượng đầu tư lẫn hàm lượng tính toán trong các báo cáo thiết kế [3]. Nhóm giải pháp kiểm soát nước (thoát nước mặt, thoát nước ngầm, che phủ bề mặt) tác động vào nguyên nhân kích hoạt; nhiều báo cáo hiện trường ghi nhận thoát nước không đầy đủ là nguyên nhân chính gây phá hoại đường và mái tự nhiên sau mưa kéo dài [4]. Theo Huang và He, cho đến nay không tồn tại một phương pháp thiết kế mái dốc chuẩn tắc có xét đến ảnh hưởng của thấm mưa [5]. Vì vậy, thoát nước mặt cần được tính toán và bố trí như một giải pháp chính, không chỉ là cấu tạo đi kèm gia cố cơ học.

Về thiết kế thoát nước mặt cho mái dốc, các phương pháp hiện có có thể được chia thành ba nhóm với mức độ định lượng tăng dần nhưng đều còn hạn chế. Nhóm thứ nhất là các phương pháp giải tích truyền thống trên bình đồ tỷ lệ 1:2000 đến 1:5000. Trình tự gồm ba bước: phân chia lưu vực thủ công dựa vào đường đồng mức, tính lưu lượng đỉnh của từng lưu vực theo công thức cường độ giới hạn, và kiểm tra khả năng thoát của rãnh đỉnh, rãnh cơ và rãnh chân bằng công thức Manning [6, 7]. Trình tự này gặp hai hạn chế trên địa hình phức tạp: (i) không xét đến hướng dòng chảy thực và lượng nước thu gom thực tế vào từng đoạn rãnh, mà chỉ giả định phân bổ đều theo diện tích; (ii) mạng lưới rãnh (vị trí và khoảng cách giữa các rãnh) được bố trí đều theo mặt cắt điển hình, phù hợp với mái đào có các bậc cơ đều đặn nhưng không áp dụng được cho mái tự nhiên không có cơ. Đối với các hệ rãnh đồng mức trong nông lâm nghiệp [8–10], khoảng cách giữa các rãnh được xác định theo công thức kinh nghiệm dạng bảng tra, tuy nhiên các khuyến nghị này chỉ áp dụng cho sườn thoải, thường độ dốc dưới khoảng 40% ($\approx 22^\circ$) [8]. Trên độ dốc lớn, Palominos-Rizzo và cs. [11] thực nghiệm trên mái dốc trồng cà phê có độ dốc 50–71% (≈ 27–35°) tại Costa Rica và so sánh hai kiểu bố trí. Hệ hố ngăn dòng so le với khoảng cách cố định theo đường đồng mức, không tạo ra sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về dòng chảy tràn và tổn thất đất so với lô đối chứng không có rãnh. Mương sườn đồi bám theo địa hình tự nhiên giảm tới 88% tổn thất đất và 60% dòng chảy tràn trên cùng điều kiện độ dốc. Kết quả này phù hợp với nguyên lý giảm chiều dài chảy tràn tích lũy và cho thấy hiệu quả phụ thuộc vào việc rãnh có bám địa hình thực hay không. Nhóm thứ hai là các phương pháp số trên mô hình số độ cao (DEM). Các thuật toán hướng dòng chảy D8 [12] và D∞ [13] cho phép tự động xác định hướng và diện tích tụ nước tại từng ô lưới; trên cơ sở đó, chỉ số ẩm địa hình TWI [14] và chỉ số năng lượng dòng chảy SPI [15] được sử dụng phổ biến để thành lập bản đồ phân vùng nguy cơ xói và trượt. Tuy nhiên, khi cách tiếp cận này được dùng để đánh giá phương án thoát nước, cách làm thường gặp là cắt raster tích lũy dòng chảy tại vị trí tuyến rãnh giả định rồi so sánh chỉ số trước và sau. Cách làm này không đưa rãnh vào quá trình lan truyền dòng chảy, nên ảnh hưởng của rãnh lên các ô lưới phía hạ lưu không được tính đến. Nhóm thứ ba là các phương pháp tối ưu hóa. Trong lĩnh vực thoát nước đô thị bền vững, cấu trúc kết hợp mô phỏng dòng chảy (mô hình SWMM) và thuật toán tiến hóa đa mục tiêu (NSGA-II, particle swarm, ant colony) đã trở thành khung tiếp cận phổ biến để tìm bố trí tối ưu các công trình kiểu phát triển ít tác động (LID) trên mạng ống [16, 17]. Trong lĩnh vực địa kỹ thuật, Widodo và cs. [18] đã tối ưu hóa vị trí và chiều dài lỗ thoát nước ngầm trên mái mỏ lộ thiên bằng thuật toán di truyền kết hợp mô phỏng nước ngầm. Tuy nhiên, các nghiên cứu này tập trung vào thoát nước

ngầm (dạng ống, lỗ khoan) chứ không phải mạng lưới rãnh thoát nước mặt bám địa hình [18–20]. Theo hiểu biết của các tác giả, chưa tìm thấy nghiên cứu áp dụng quy trình mô phỏng và tối ưu cho bài toán bố trí mạng lưới rãnh mặt trên mái dốc lớn có DEM độ phân giải cao.

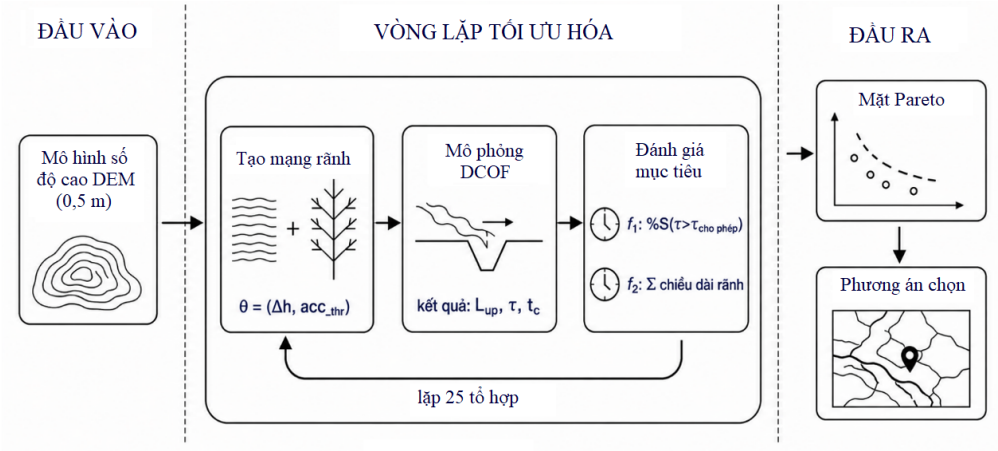
Ngoài phương pháp tính, vị trí đặt rãnh trên mái, hay còn gọi là quan điểm bố trí rãnh, là một vấn đề riêng cần được xem xét. Các quan điểm hiện có bao gồm: bố trí rãnh phân bố đều trên bề mặt mái theo tiêu chuẩn đường ô tô [6, 7], bố trí rãnh bám đường đồng mức [8–10], bố trí rãnh bám đường tụ thủy, hoặc bố trí kết hợp. Các nghiên cứu về sự cố của những mái dốc đã có hệ thống thoát nước cho thấy phần lớn hệ thống không phát huy được tác dụng, thậm chí còn gây xói lở và trượt mái. Cụ thể, Montgomery ghi nhận rằng nước thoát tập trung từ các tuyến đường tại một số điểm xả trên sườn dốc hình thành các rãnh xói mới, nối vào mạng khe suối tự nhiên và làm tăng nguy cơ trượt lở [21]. Từ các ghi nhận này, có thể rút ra ba nguyên nhân thường lặp lại: (i) nước tập trung tại điểm xả và gây xói phía dưới; (ii) công trình thoát nước bị hư hỏng hoặc tắc nghẽn tại điểm xả; (iii) vị trí và hướng tuyến rãnh không dựa trên hướng dòng chảy thực trên mái, nên rãnh không chặn được dòng tại nơi nước thực sự tập trung. Từ ba nguyên nhân này, bố trí rãnh cần đồng thời đáp ứng hai yêu cầu. Yêu cầu thứ nhất là giảm chiều dài chảy tràn tích lũy trên toàn mái, vì ứng suất cắt tăng theo chiều dài chảy tràn, nên sườn càng dài thì nguy cơ xói càng lớn. Yêu cầu thứ hai là chặn dòng tại các khe tụ thủy, nơi nước đã tập trung tự nhiên và có khả năng gây xói lớn. Bố trí bám đường đồng mức chủ yếu đáp ứng yêu cầu thứ nhất nhưng không xét đến vị trí tập trung dòng, còn bố trí bám đường tụ thủy chủ yếu đáp ứng yêu cầu thứ hai nhưng để nguyên chiều dài chảy tràn trên các sườn giữa các khe. Vì vậy, không quan điểm đơn lẻ nào đáp ứng được cả hai yêu cầu; cần một bố trí kết hợp có căn cứ định lượng. Trong giai đoạn 2020–2026, dữ liệu UAV chủ yếu được dùng để phân tích cân bằng giới hạn 3D [22] và quan trắc chuyển vị [23]. Các hướng này tập trung vào đánh giá ổn định và theo dõi biến dạng của mái, không nhằm thiết kế bố trí thu gom nước mặt. Nghiên cứu này tập trung vào thiết kế thu gom nước mặt và chỉ đánh giá nguy cơ xói bề mặt; thấm, áp lực nước lỗ rỗng và hệ số an toàn chống trượt chưa được xét.

Từ các phân tích trên, khoảng trống nghiên cứu không nằm ở câu hỏi "thoát nước mặt có quan trọng không" mà ở câu hỏi "làm sao biến bố trí rãnh thành một bài toán tối ưu có căn cứ định lượng, tương thích với DEM độ phân giải cao, và tránh được các nguyên nhân gây hư hỏng đã ghi nhận" [5]. Ba nhánh của khoảng trống này là: (i) chưa có quan điểm bố trí kết hợp hai nhóm rãnh ngang và rãnh dọc bám địa hình được phát biểu tường minh và kiểm chứng định lượng cho mái dốc có độ dốc lớn; (ii) chưa có mô hình tính trong đó tuyến rãnh tham gia trực tiếp vào quá trình lan truyền dòng chảy với tiêu chí đánh giá gắn ngưỡng vật lý; (iii) chưa có khung tối ưu hóa bố trí rãnh mặt sử dụng mô phỏng đầy đủ làm hàm mục tiêu. Điểm mới của nghiên cứu là sự kết hợp ba nội dung: (a) quan điểm bố trí kết hợp hai nhóm rãnh bám địa hình thay cho bố trí rãnh phân bố đều trên bề mặt mái; (b) mô hình mô phỏng dòng chảy tràn liên kết rãnh (DCOF), trong đó rãnh giữ lại dòng chảy đến nó và không truyền tiếp xuống phía dưới (điều kiện biên hấp thụ); (c) khung tối ưu hóa Pareto hai mục tiêu giữa kiểm soát nguy cơ xói bề mặt và chi phí. Giải pháp được kiểm nghiệm bằng mô hình số nhằm chứng minh rằng một hệ thống rãnh bố trí tốt làm giảm lượng nước trên mái và mức độ xói đúng như đề xuất.

2. Phương pháp thu gom nước bám địa hình

Phương pháp đề xuất gồm ba thành phần, tạo thành cấu trúc vòng lặp "Đề xuất, Đánh giá, Tối ưu": với mỗi tổ hợp tham số bố trí (Δh, acc_{thr}), thuật toán ở Mục 2.1 tạo mạng lưới rãnh tương ứng từ DEM; mô hình DCOF ở Mục 2.2 mô phỏng dòng chảy tràn có rãnh và cho ra hai chỉ số mục tiêu; bộ tối ưu hóa Pareto ở Mục 2.3 nhận hai chỉ số đó, điều phối vòng lặp qua toàn bộ tổ hợp tham số và tổng hợp tập nghiệm hiệu quả. Sơ đồ tổng thể được thể hiện trong Hình 1. Mô hình số dùng để so sánh các

bố trí rãnh với nhau và với mái không rãnh, nhằm kiểm tra giải pháp giảm nước trên mái như đề xuất, không nhằm dự báo giá trị xói tuyệt đối.



Hình 1. Sơ đồ tổng thể phương pháp đề xuất

2.1. *Thuật toán tạo mạng rãnh bám địa hình*

Mạng lưới rãnh gồm hai nhóm rãnh bổ sung cho nhau: rãnh ngang bám đường đồng mức và rãnh dọc bám đường tụ thủy. Mạng được tạo tự động từ DEM và được điều khiển bởi hai tham số: khoảng cách cao độ Δh giữa hai rãnh ngang liên tiếp và ngưỡng diện tích tụ nước acc_{thr} dùng để chọn rãnh dọc.

Nhóm rãnh ngang bám đường đồng mức kế thừa nguyên lý rãnh đồng mức giảm chiều dài chảy tràn tích lũy trên mái [8, 10]. Thay vì xác định khoảng cách rãnh bằng công thức kinh nghiệm phụ thuộc độ dốc, nghiên cứu này đưa khoảng cách cao độ giữa hai rãnh liên tiếp Δh thành tham số tối ưu hóa. Các tuyến rãnh được trích xuất tự động từ mô hình số địa hình (DTM) bằng thuật toán Marching squares, tại các mặt cắt cao độ cách đều Δh; sau đó cắt về phạm vi vùng mái và loại bỏ các đoạn có chiều dài nhỏ hơn 5 m. Nhóm rãnh dọc bám đường tụ thủy được tạo từ lưới (raster) tích lũy dòng chảy D∞ [13] (ký hiệu acc, đơn vị m^2) sau khi giữ lại các ô của mạng tụ thủy nền có $acc \geq acc_{thr}$. Thuật toán gồm ba bước. Bước thứ nhất thu gọn vùng tụ thủy về tuyến trung tâm dạng đường đơn, rộng một pixel. Bước thứ hai xác định điểm đầu nguồn của từng tuyến. Bước thứ ba dò vết tuyến theo tám hướng liên thông, ưu tiên pixel thấp hơn; để tuyến không bị chặn ở vùng phẳng hoặc trũng cục bộ, tuyến được phép bước sang pixel cao hơn pixel hiện tại không quá $\Delta z_{flat} = 0{,}5$ m. Kịch bản KB1 (xem Mục 3.2) giữ toàn bộ nhánh tụ thủy mịn (không lọc theo ngưỡng, $acc_{thr} = 0$).

Hai nhóm rãnh được nối thành một mạng thu gom: rãnh dọc dẫn nước vào rãnh ngang, và rãnh ngang được thiết kế để dẫn nước ra ngoài mái (mô hình giả thiết rãnh hấp thụ hoàn toàn, Mục 2.2). Toàn bộ hình thái mạng phụ thuộc hai tham số $\boldsymbol{\theta} = (\Delta h, acc_{thr})$, là véc-tơ biến cho bài toán tối ưu.

2.2. *Mô hình mô phỏng dòng chảy tràn liên kết rãnh (DCOF)*

Để tối ưu hóa bố trí rãnh, nghiên cứu đề xuất mô hình DCOF (Ditch-Coupled Overland Flow) trực tiếp trên DEM, đánh giá mức độ hiệu quả của mạng rãnh ứng với véc-tơ tham số $\boldsymbol{\theta}$ cho trước; mô hình có ba đặc trưng chính:

(a) rãnh giữ lại dòng chảy đến nó và không truyền tiếp xuống phía dưới (điều kiện biên hấp thụ). Dòng chảy được lan truyền trên lưới theo hướng dốc nhất D8 [12], duyệt theo thứ tự cao độ giảm dần. Với ô p có ô nhận $d(p)$:

$$A[d(p)] \leftarrow A[d(p)] + A[p] \tag{1}$$

$$L_{up}[d(p)] \leftarrow \max(L_{up}[d(p)], L_{up}[p] + \Delta s) \tag{2}$$

trong đó A là diện tích tụ nước (m^2), L_{up} là chiều dài chảy tràn tích lũy (m) và Δs là khoảng cách giữa hai tâm ô. Nếu ô p thuộc mặt nạ rãnh D thì ô p không truyền A và chiều dài chảy tràn tích lũy cho ô nhận $d(p)$:

$$p \in D \Rightarrow \text{bỏ qua phép cập nhật (1) và (2) đối với } d(p) \tag{3}$$

Các ô nằm ngay phía hạ lưu rãnh bắt đầu lại với $A = 1$ ô và $L_{up} = 0$, thể hiện việc rãnh đã cắt và thu gom dòng chảy phía trên. Trong DCOF, vị trí rãnh ảnh hưởng trực tiếp đến toàn bộ trường L_{up}, τ và t_c phía hạ lưu.

(b) đánh giá nguy cơ xói thông qua ứng suất cắt bề mặt. Chỉ số ẩm địa hình TWI và chỉ số năng lượng dòng chảy SPI chỉ phản ánh mức độ tập trung nước tương đối giữa các vị trí, không cho phép kết luận vị trí nào đang bị xói. Ngược lại, ứng suất cắt bề mặt τ của dòng tràn cho phép kết luận xói hay không xói tại từng ô lưới, bằng cách so sánh với ngưỡng cho phép τ_{allow} của vật liệu bề mặt. Sau khi lan truyền, τ được tính theo chuỗi:

$$q = C \cdot i \cdot L_{up} \tag{4}$$

$$h = (q \cdot n / S^{0,5})^{0,6} \tag{5}$$

$$\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot S \tag{6}$$

trong đó q là lưu lượng trên một đơn vị bề rộng (m^2/s) của dải mái, theo giả thiết dòng chảy tràn dạng màng; C là hệ số dòng chảy; i là cường độ mưa (m/s, đổi từ mm/h); n là hệ số nhám Manning; $S = \tan\beta$ là độ dốc; ρ là khối lượng riêng của nước (kg/m^3); g là gia tốc trọng trường (m/s^2). Hiện tượng xói xảy ra khi $\tau > \tau_{allow}$ (τ_{allow} phụ thuộc vào bề mặt mái dốc như đất trống, cỏ thưa hay có các biện pháp gia cố bề mặt [4]). Diện tích tụ A ở công thức (1) không tham gia công thức (4); cách tính q theo diện tích tụ riêng $a = A/b$ (b là cạnh ô) được so sánh ở Mục 4.4.

(c) mô hình diện rộng toàn mái và chỉ số thời gian tập trung nước. Khác với phương pháp truyền thống chỉ đánh giá tại vài mặt cắt đại diện (Bảng 1), DCOF cho ra bản đồ τ trên toàn lưới, cho phép xác định vị trí và diện tích có nguy cơ xói trên toàn bộ mái. Thời gian tập trung nước t_c tại từng ô lưới được tính theo công thức sóng động học:

$$t_c = 6{,}94 \cdot (n \cdot L)^{0,6} / (i^{0,4} \cdot S^{0,3}) \tag{7}$$

Giá trị t_c phản ánh tốc độ nước rời khỏi mái: khi mạng rãnh cắt dòng sớm hơn, t_c giảm, nước thoát khỏi mặt mái nhanh hơn. t_c là thời gian tập trung của dòng chảy mặt, không đồng nhất với thời gian thấm, nên được dùng làm chỉ báo về tốc độ thoát nước mặt; mức giảm lượng nước thấm tương ứng chưa được định lượng trong nghiên cứu này.

- Giả thiết và điều kiện áp dụng của mô hình: (i) Rãnh được xây đá (gia cố chống thấm và chống xói) và hấp thụ hoàn toàn lưu lượng đến; khả năng tải, tràn rãnh và tập trung dòng tại điểm xả chưa được mô phỏng (Mục 4.4). (ii) Trong công thức (7), L là chiều dài chảy tràn tích lũy L_{up} (m) tại ô tính, i tính bằng mm/h và t_c tính bằng phút. (iii) Dòng chảy được lan truyền theo D8 vì mô hình cần đường dòng đơn (mỗi ô có một ô nhận) để xác định L_{up} và để rãnh ngắt dòng. Mạng tụ thủy được trích từ diện tích tụ D∞ vì D∞ phân bố dòng chảy liên tục, ít thiên lệch hướng hơn D8 trên mái gần phẳng. (iv) L_{up} lớn nhất đạt 186 m nhưng chỉ xuất hiện cục bộ (trung bình 18,7 m, phân vị 90% (P90) = 43,1 m). Giả thiết dòng chảy tràn dạng màng mỏng kém chính xác khi chiều dài dòng chảy lớn, nên các giá trị cực đại được diễn giải thận trọng.

Bảng 1. Tổng hợp sự khác biệt giữa phương pháp DCOF và phương pháp truyền thống

Tiêu chí	Truyền thống	DCOF (đề xuất)
Phân chia lưu vực	Thủ công trên bình đồ	Tự động từ DEM
Vai trò rãnh trong mô hình	Không tham gia	Điều kiện biên hấp thụ
Tiêu chí xói	Lưu lượng/vận tốc tại mặt cắt	Ứng suất cắt τ so ngưỡng vật lý, toàn mái
Phạm vi kết quả	Vài mặt cắt đại diện	Toàn bộ lưới raster
So sánh phương án	Không có cơ chế	Hàm mục tiêu cho tối ưu hóa

2.3. Mô hình tối ưu hóa

Bài toán tối ưu bố trí rãnh trong nghiên cứu này được phát biểu dưới dạng bài toán tối ưu hóa hai mục tiêu như sau:

$$\text{Minimize } \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) = (f_1, f_2) \tag{8}$$

trong đó $\boldsymbol{\theta} = (\Delta h, acc_{thr})$ là véc-tơ biến quyết định gồm hai tham số điều khiển hình thái mạng rãnh đã định nghĩa ở Mục 2.1. Hai hàm mục tiêu được xác định như sau:

$$f_1 = \%S(\tau > \tau_{allow}) \text{ tại } i_{max} \text{ hoặc } i_{\text{yêu cầu}} \text{ mm/h} \tag{9}$$

$$f_2 = \sum \text{chiều dài rãnh (m)} \tag{10}$$

Mục tiêu f_1 là tỷ lệ diện tích mái S có ứng suất cắt vượt ngưỡng cho phép $\tau > \tau_{allow}$, tính theo cường độ mưa yêu cầu (cấp cường độ mưa đang xét, thường là cấp lớn nhất), phản ánh nguy cơ xói bề mặt; f_2 là tổng chiều dài rãnh, đại diện gần đúng cho chi phí thi công. Chiều dài này được tính bằng số pixel của mặt nạ rãnh nhân với cạnh ô; vì bước chéo chỉ được đếm là một ô, chiều dài đường thực lớn hơn giá trị tính khoảng 21–24%.

Mỗi tổ hợp tham số $\boldsymbol{\theta}$ sau khi chạy qua mô hình DCOF cho ra một cặp giá trị (f_1, f_2), tương ứng một điểm trên mặt phẳng mục tiêu. Điểm A trội hơn điểm B nếu A có f_1 nhỏ hơn và f_2 cũng nhỏ hơn B, tức A tốt hơn B về cả kiểm soát xói bề mặt lẫn chi phí. Điểm bị trội được loại khỏi tập kết quả. Các điểm còn lại, không điểm nào bị điểm khác trội hơn, tạo thành mặt Pareto [17]. Trên mặt Pareto, muốn giảm diện tích xói hơn nữa thì buộc phải chấp nhận tăng chiều dài rãnh, và ngược lại.

Không gian biến được rời rạc hóa; trong nghiên cứu này, hai tham số được khảo sát theo các mức sau:

$$\Delta h \in \{5; 8; 10; 15; 20\} \text{ m} \tag{11}$$

$$acc_{thr} \in \{10; 25; 50; 100; 200\} \text{ m}^2 \tag{12}$$

Các mức Δh được chọn để bao phủ dải khoảng cách rãnh từ dày đến thưa trong điều kiện thi công thực tế; các mức acc_{thr} tương ứng với dải diện tích lưu vực từ khe tụ thủy nhỏ đến khe chính của khu vực. Hai bộ mức tạo thành $5 \times 5 = 25$ tổ hợp, mỗi tổ hợp được đánh giá bằng thuật toán ở Mục 2.1 và mô hình DCOF ở Mục 2.2; tập nghiệm Pareto được lọc từ 25 cặp (f_1, f_2). Phép quét toàn bộ không gian rời rạc kích thước nhỏ này cho mặt Pareto đầy đủ trong phạm vi các mức đã chọn và cho kết quả tái lập được. Khi mở rộng sang không gian tham số liên tục hoặc nhiều chiều hơn, thuật toán tiến hóa đa mục tiêu NSGA-II [17] có thể thay thế phép quét toàn bộ mà không thay đổi cấu trúc tổng thể của phương pháp.

2.4. Quy trình thực hiện và dữ liệu đầu vào, đầu ra

Phương pháp DCOF được triển khai theo sáu bước, được tổng hợp trong Bảng 2. Dữ liệu đầu vào gồm: mô hình số bề mặt (DSM) có kích thước ô lưới không lớn hơn 1 m; ba tham số đặc trưng bề mặt mái là hệ số dòng chảy C, hệ số nhám Manning n và ứng suất cắt cho phép τ_{allow} xác định theo vật liệu bề mặt; cường độ mưa i lấy từ số liệu thực đo (QCVN 02:2022/BXD, bảng lượng mưa lớn nhất trung bình thời đoạn) hoặc từ đường IDF ứng với chu kỳ lặp lựa chọn.

- Xử lý dữ liệu địa hình gồm bốn bước như sau. Bước thứ nhất, DSM do UAV thu nhận (độ phân giải khoảng 0,2 m) được lọc thực vật bằng phép mở hình thái trên phần dư so với bề mặt nền làm trơn Gaussian (σ nền = 5 m; kích thước phần tử cấu trúc r = 6 m; làm mịn cuối σ = 0,8 m), sau đó tái chia mẫu về 0,5 m, thu được DTM. Bước thứ hai, trong mô hình DCOF, DTM được làm trơn thêm bằng bộ lọc Gaussian σ = 1,0 m. Bước thứ ba, trũng và vùng phẳng được xử lý bằng thuật toán khoan và lấp trũng của WhiteboxTools trước khi tính hướng dòng chảy. Bước thứ tư, dòng chảy được lan truyền trên toàn lưới DEM (13,8 ha), nên các pixel thượng lưu ngoài ranh mái cũng đóng góp dòng chảy vào mái; các chỉ số f_1, L_{up}, τ và t_c chỉ được thống kê trên mặt nạ mái (khoảng 5,0 ha).

Bảng 2. Quy trình sáu bước tạo và tối ưu mạng rãnh thoát nước mặt

Bước	Nội dung	Đầu ra
1	Lọc tán thực vật: áp dụng phép mở hình thái với bán kính r và làm mịn Gaussian độ lệch chuẩn σ lên DSM gốc nhằm loại bỏ điểm thực vật và trả về mô hình số địa hình DTM	DTM
2	Tiền xử lý thủy văn: lấp trũng cục bộ; tính hướng dòng chảy D∞ và D8; tính độ dốc cục bộ S theo sai phân hữu hạn trung tâm	Bản đồ độ dốc S, hướng dòng chảy D∞/D8
3	Xác định mạng tụ thủy: quét nhiều ngưỡng diện tích tích lũy, chọn ba mức (mịn, trung bình, khe chính) thể hiện rõ phân nhánh; ba mức này tạo mạng nền chung cho mọi tổ hợp $\boldsymbol{\theta}$, khác với năm mức acc_{thr} ở bước 4	Mạng tụ thủy
4	Tạo mạng rãnh (Mục 2.1) với $\boldsymbol{\theta} = (\Delta h, acc_{thr})$: rãnh đồng mức tại các bậc cao độ cách nhau Δh và rãnh dọc từ mạng tụ thủy ngưỡng acc_{thr} (lọc các nhánh của mạng nền mức mịn và trung bình theo năm mức acc_{thr}, thu gọn về tuyến trung tâm một pixel, dò vết theo tám hướng liên thông, ưu tiên pixel có cao độ thấp hơn, cho phép vượt đoạn phẳng không quá Δz_{flat}); hợp nhất thành mặt nạ nhị phân $R(\boldsymbol{\theta})$	Mặt nạ rãnh $R(\boldsymbol{\theta})$
5	Mô phỏng DCOF (Mục 2.2) với $R(\boldsymbol{\theta})$ cho từng cấp cường độ mưa i; tính L_{up}, τ, t_c trên toàn mái; tổng hợp cặp chỉ số (f_1, f_2)	Bản đồ L_{up}, τ, t_c; cặp chỉ số (f_1, f_2)
6	Tối ưu hóa (Mục 2.3): lặp bước 4–5 cho toàn bộ tổ hợp $\boldsymbol{\theta}$ trong lưới tham số; lọc tập nghiệm Pareto theo nguyên tắc trội chặt trên cặp (f_1, f_2)	Mặt Pareto; bản đồ rãnh và τ của các phương án hiệu quả

3. Áp dụng cho mái dốc thực tế

3.1. Khu vực nghiên cứu

Phương pháp được áp dụng cho mái taluy CT05 tại phường Cam Đường, tỉnh Lào Cai (tọa độ trung tâm: 22°26′N, 103°59′E), thuộc vùng đồi núi phía Bắc Việt Nam. Bề mặt mái được khảo sát bằng UAV (xử lý số liệu ở Mục 2.4). Mái được lựa chọn do hai đặc điểm quyết định sự phù hợp cho kiểm nghiệm: độ dốc lớn, với 30,8% diện tích dốc trên 40° (tỷ lệ này thay đổi từ 12% đến 47% giữa các dải cao độ), vượt xa phạm vi áp dụng của rãnh đồng mức truyền thống (dưới khoảng 22°), và mạng khe tụ thủy thưa, không đều. Các thông số hình học của mái được tổng hợp trong Bảng 3.

Các cấp cường độ mưa được xác định theo QCVN 02:2022/BXD (Bảng 2.27, lượng mưa lớn nhất trung bình thời đoạn) [24], sử dụng số liệu trạm Lào Cai. Mái dốc diện tích nhỏ có thời gian tập trung nước ngắn, nên thời đoạn tính toán được lấy là $t = 10$ phút, là thời đoạn nhỏ nhất trong bảng (hạn chế liên quan được nêu ở Mục 4.4). Bốn cấp cường độ $i \in \{90; 120; 150; 180\}$ mm/h được chọn để bao phủ dải thực tế của khu vực. Cấp 90 mm/h là cường độ lớn nhất quan trắc được tại $t = 60$ phút, cấp 120 mm/h là cường độ trung bình cực đại năm tại $t = 10$ phút, cấp 180 mm/h là cường độ lớn nhất quan trắc được tại $t = 10$ phút (177,6 mm/h, làm tròn). Cấp 150 mm/h là cấp trung gian. Các cấp này là cường độ thực đo, không gắn với một chu kỳ lặp thiết kế cụ thể.

Nghiên cứu tập trung vào taluy dương phía đông tuyến đường (bên phải tuyến theo hướng Bắc, Hình 2(b)). Đây là khu vực có mái dốc phủ thực vật dày liên tục toàn bề mặt, diện tích xấp xỉ 5,0 ha, được khoanh vùng bằng đường ranh giới taluy thể hiện trong Hình 3, và là đối tượng được đưa vào mô phỏng DCOF và tối ưu hóa bố trí rãnh. Các tham số bề mặt phản ánh trạng thái mái phủ thực vật dày liên tục: hệ số dòng chảy $C = 0{,}65$ ứng với lớp phủ cỏ và cây bụi dày trên mái dốc tự nhiên; hệ số nhám Manning $n = 0{,}06$; ứng suất cắt cho phép $\tau_{allow} = 10$ Pa, là giá trị bảo thủ cho mái tự nhiên dốc có lớp phủ không đồng đều, thấp hơn ngưỡng tham chiếu của thảm cỏ nhóm sức cản C và D (phân loại theo chiều cao và độ dày của cỏ, khoảng 29–48 Pa theo [6, 25]); ảnh hưởng của C, n và τ_{allow} được khảo sát ở Mục 4.4.

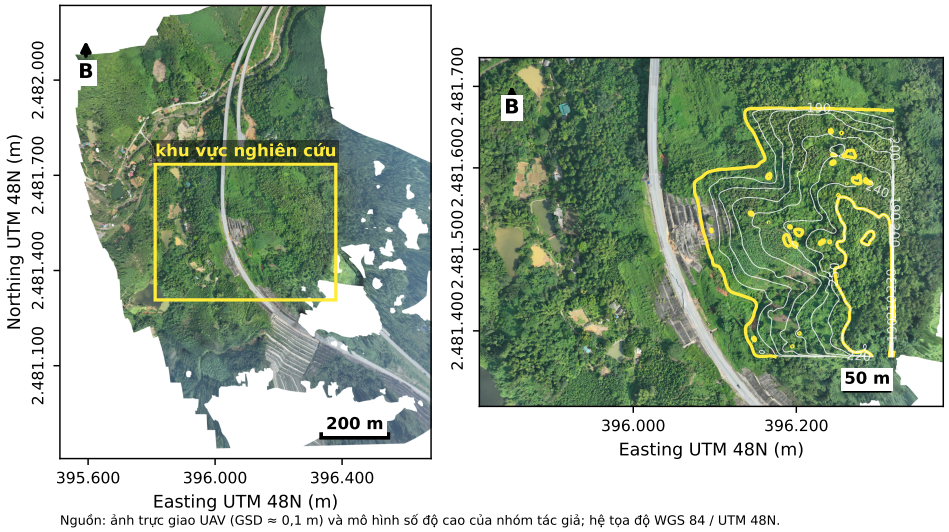
Bảng 3. Thông số mái dốc nghiên cứu

Thông số	Giá trị
Hệ tọa độ, lưới	EPSG:32648; 616 × 898 ô (308 × 449 m, ~13,8 ha)
Vùng mái phân tích	Cao độ 180–250 m; ~5,0 ha; độ dốc trung bình 35° (trung vị 34°)
Phân bố dốc	Độ dốc trung bình theo dải cao độ 10 m: 180–190 m: 38°; 190–200 m: 42°; 200–210 m: 41°; 210–220 m: 32°; 220–230 m: 29°; 230–240 m: 33°; 240–250 m: 34°
Đặc điểm	Mái tự nhiên không cơ; 30,8% diện tích dốc trên 40° (từ 12% đến 47% giữa các dải cao độ); P95 = 62°, P99 = 86°

3.2. Kịch bản so sánh

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp tạo mạng rãnh bám địa hình, ba kịch bản mô phỏng (KB0–KB2) được thiết lập trên cùng một DEM và cùng bộ thông số đầu vào (C, n, τ_{allow}, i), bảo đảm mọi khác biệt về kết quả chỉ xuất phát từ cấu hình rãnh, không phải từ điều kiện biên.

- Kịch bản KB0: Hiện trạng không rãnh là kịch bản cơ sở đối chứng, trong đó mặt nạ rãnh $R(\boldsymbol{\theta}) = \emptyset$ và toàn bộ dòng chảy tràn lan truyền tự do trên mái theo địa hình tự nhiên. Mô phỏng DCOF trên KB0 cho phép xác định phân bố ứng suất cắt τ và chiều dài chảy tràn tích lũy L_{up} trong điều kiện không có sự can thiệp.



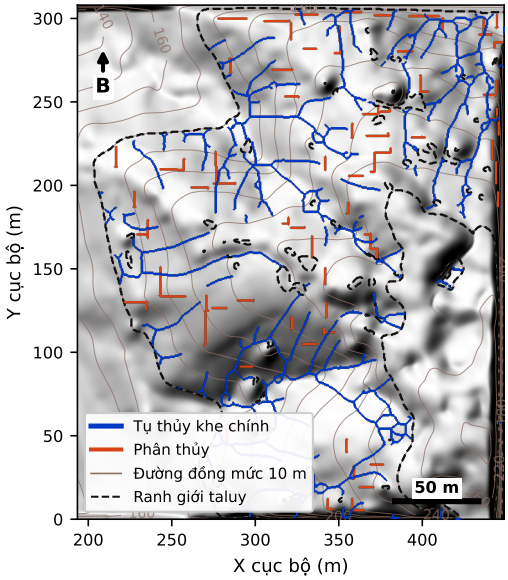
Nguồn: ảnh trực giao UAV (GSD ≈ 0,1 m) và mô hình số độ cao của nhóm tác giả; hệ tọa độ WGS 84 / UTM 48N.

(a) Vị trí trên ảnh trực giao UAV (b) Mái taluy CT05 (ranh vàng) và đường đồng mức 10 m

Hình 2. Khu vực nghiên cứu

- Kịch bản KB1: Bố trí bám địa hình với tham số mặc định: khoảng cách cao độ Δh = 10 m, giữ toàn bộ nhánh tụ thủy mịn (không lọc theo ngưỡng diện tích tụ, acc_{thr} = 0), tạo bằng phương pháp ở Mục 2.1. Đây là bố trí thu được khi áp dụng phương pháp mà chưa qua bước tối ưu hóa, nên KB1 là cơ sở để đánh giá phần cải thiện do tối ưu hóa Pareto mang lại. Bố trí truyền thống không được dựng thành kịch bản số; lý do nêu ở Mục 4.2.

- Kịch bản KB2: Bố trí rãnh có f_1 nhỏ nhất trên mặt Pareto là kịch bản chính của nghiên cứu. Trong tập nghiệm Pareto của 25 tổ hợp tham số (Mục 2.3), nghiệm có f_1 nhỏ nhất (diện tích mái có $\tau > \tau_{allow}$ tối thiểu tại i = 180 mm/h) được chọn làm KB2. Nghiệm này gồm rãnh ngang bám đường đồng mức và rãnh dọc bám đường tụ thủy, ứng với Δh = 5 m và acc_{thr} = 10 m^2.



Hình 3. Mạng tụ thủy và phân thủy trên nền địa hình bóng đổ của DTM khu vực nghiên cứu

4. Kết quả và thảo luận

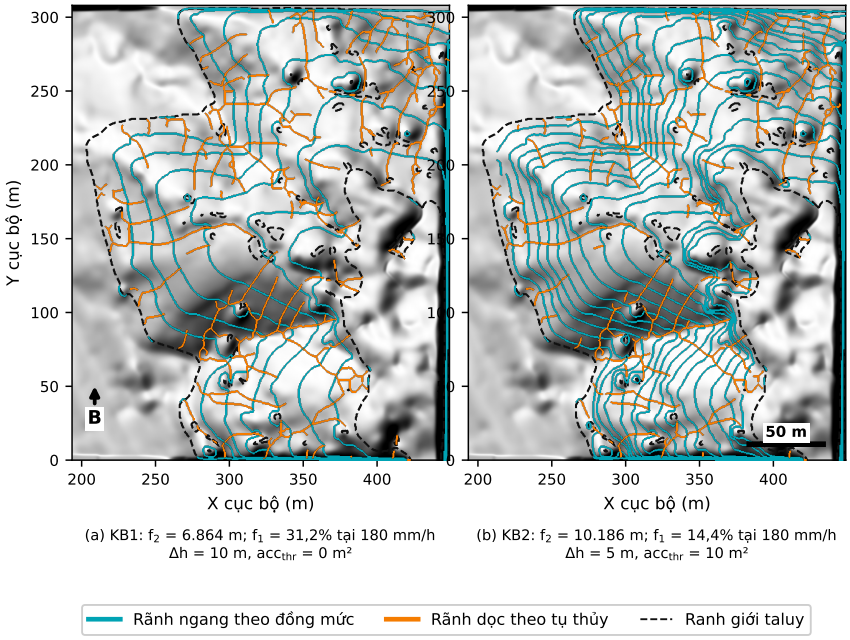
4.1. Hiện trạng mái không rãnh

Kết quả mô hình DCOF với kịch bản KB0 cho thấy chiều dài chảy tràn tích lũy cực đại đạt $L_{up,max}$ = 185,9 m. Tại cấp cường độ thấp nhất i = 90 mm/h, ứng suất cắt cực đại đã đạt τ_{max} = 214,7 Pa, gấp 21,5 lần ngưỡng τ_{allow} = 10 Pa và 41,0% diện tích mái vượt ngưỡng xói cho phép. Khi cường độ mưa tăng lên mức cao nhất i = 180 mm/h, τ_{max} tăng lên 325,5 Pa và tỷ lệ diện tích vượt ngưỡng đạt 63,0%, trong khi thời gian tập trung nước trung bình t_c rút ngắn còn 0,9 phút. Giá trị τ_{max} xuất hiện tại một số ô có độ dốc cục bộ lớn: ô đạt τ_{max} có $\tan\beta$ = 11,5 (khoảng 85°) và L_{up} = 102 m, không phải ô có L_{up} lớn nhất. Do đó τ_{max} không đại diện cho mái; tại i = 180 mm/h, phân vị 95% và

99% của ứng suất cắt (P95 và P99) lần lượt là 41,5 Pa và 105,9 Pa. Đây là mức tham chiếu để đánh giá hiệu quả của giải pháp ở Mục 4.2.

4.2. So sánh các kịch bản

Hình 4 thể hiện bản đồ mạng rãnh của KB1 và KB2 trên nền DTM. KB1 tạo ra các rãnh ngang cách nhau đều theo cao độ, kèm rãnh dọc với mật độ trung bình; KB2 rút ngắn khoảng cách cao độ xuống $\Delta h = 5$ m và mở rộng mạng rãnh dọc bám sát toàn bộ khe tụ thủy cấp nhỏ ($acc_{thr} = 10$ m^2), dẫn đến tổng chiều dài rãnh tăng từ 6.864 m lên 10.186 m.



(a) KB1 (b) KB2

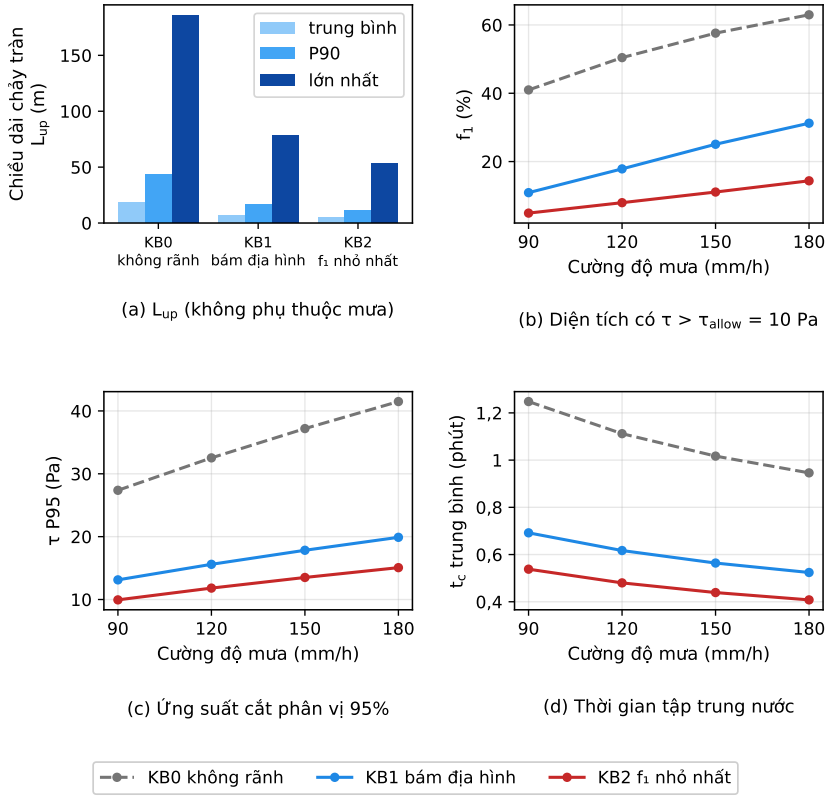
Hình 4. Mạng rãnh bám địa hình của KB1 và KB2

Bảng 4. So sánh ba kịch bản tại cấp cường độ 180 mm/h (cực trị quan trắc)

Chỉ số	KB0	KB1	KB2
$L_{up,max}$ (m)	185,9	78,2	53,2
$\%S$ ($\tau > 10$ Pa)	63,0%	31,2%	14,4%
τ_{max} (Pa)	325,5	187,2	159,0
τ_{mean} (Pa)	17,1	8,5	6,4
t_c trung bình (phút)	0,9	0,5	0,4
Tổng chiều dài rãnh (m)	0	6.864	10.186

Kết quả tính toán ở Bảng 4 cho thấy, so với hiện trạng KB0, kịch bản KB1 giảm 57,9% chiều dài chảy tràn lớn nhất $L_{up,max}$ và giảm 31,8 điểm phần trăm diện tích vượt ngưỡng xói tại cường độ mưa lớn nhất $i = 180$ mm/h; kịch bản KB2 giảm tương ứng 71,4% và 48,6 điểm phần trăm. Sự cải thiện này duy trì nhất quán trên toàn dải bốn cấp cường độ mưa (Hình 5). Ba chỉ số cùng chiều: mạng rãnh càng dày thì nước tích lũy trên mái càng ít, ứng suất cắt càng thấp và nước rời mái càng nhanh. So sánh riêng KB1 và KB2 cho thấy bước tối ưu hóa Pareto giảm thêm 16,8 điểm phần trăm diện tích vượt ngưỡng (từ 31,2% xuống 14,4%), với chi phí tăng thêm 3.322 m rãnh (+48%).

Nghiên cứu không dựng bố trí truyền thống thành kịch bản số để so sánh. Thiết kế điển hình cho mái đường chỉ có ba loại rãnh là rãnh đỉnh, rãnh cơ và rãnh chân, bất kể chiều cao mái. Rãnh cơ chỉ có khi mái có cơ, và các cơ cách nhau tối đa 12 m. Rãnh dọc của thiết kế này chạy thẳng từ đỉnh xuống chân mái. Bố trí đề xuất khác ở hai điểm. Thứ nhất, mái không có cơ; rãnh ngang được đặt theo đường đồng mức của chính mái, uốn theo địa hình, với khoảng cách cao độ Δh là tham số cần chọn. Thứ hai, rãnh dọc đi theo đường tụ thủy, không chạy thẳng từ trên xuống. Vì vậy không có bố trí truyền thống nào cùng tổng chiều dài rãnh mà không bám địa hình để so sánh: các rãnh thẳng, song song trên mái có địa hình thay đổi như CT05 khó thi công.



Hình 5. So sánh các chỉ số của các kịch bản KB0–KB2 theo bốn cấp cường độ mưa

4.3. Phân tích mặt Pareto

Trong tổng số 25 tổ hợp $\boldsymbol{\theta}$ được đánh giá, 21 tổ hợp tạo thành mặt Pareto (Bảng 5 liệt kê 9 nghiệm tiêu biểu, Hình 6). Tỷ lệ 21/25 lặp lại ở cả bốn cấp cường độ mưa, và nghiệm có f_1 nhỏ nhất luôn là (Δh = 5 m; acc_{thr} = 10 m^2), chính là nghiệm được chọn làm KB2.

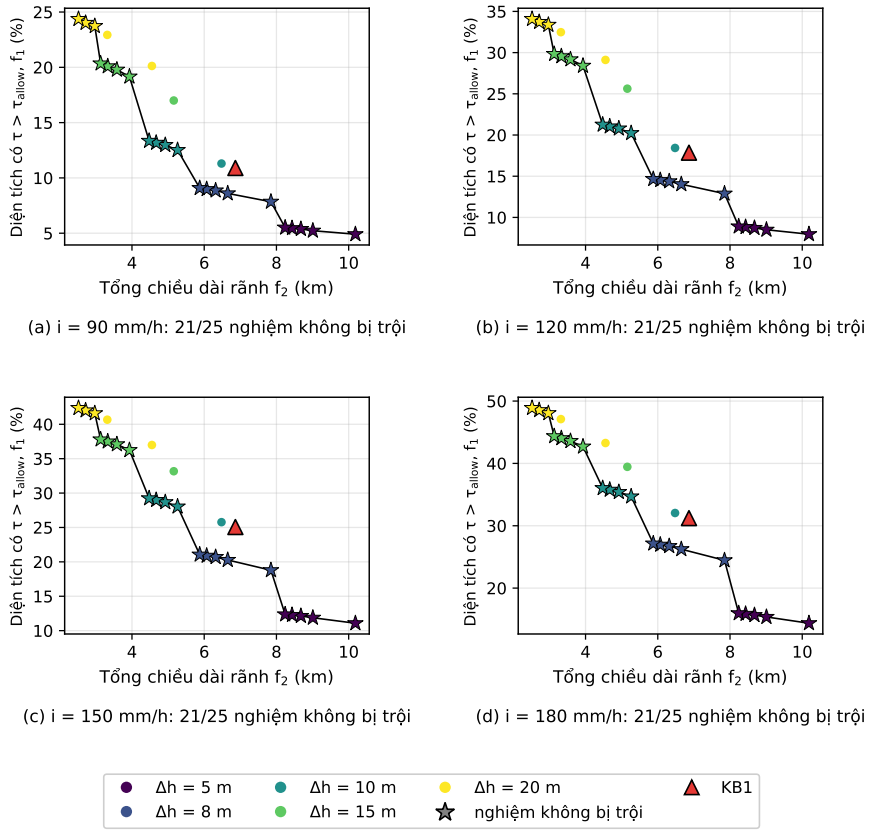
Quan hệ trên mặt Pareto có hai đặc điểm. Thứ nhất, Δh chi phối f_1 là chủ yếu: dọc theo cột acc_{thr} = 10 m^2, khi giảm Δh qua bốn nấc liên tiếp từ 20 m xuống 15, 10, 8 và 5 m, f_1 giảm lần lượt 3,8; 7,5; 7,5 và 10,1 điểm phần trăm, còn f_2 tăng lần lượt 605; 1.322; 1.369 và 2.338 m. Thứ hai, acc_{thr} ảnh hưởng thứ cấp với chi phí biên thấp: tại Δh = 5 m, hạ acc_{thr} từ 50 m^2 xuống 10 m^2 chỉ cải thiện thêm 1,3 điểm phần trăm f_1 với chi phí 1.509 m rãnh bổ sung, phản ánh việc rãnh dọc cấp nhỏ đóng vai trò bổ trợ chứ không thay thế được rãnh ngang trong việc giảm L_{up}.

Nghiệm (Δh = 8 m, acc_{thr} = 25 m^2) nằm trên mặt Pareto với f_2 = 6.651 m, ít hơn KB1 khoảng 213 m, nhưng đạt f_1 = 26,2%, thấp hơn mức 31,2% của KB1. Khoảng cách cao độ nhỏ hơn (8 m so

với 10 m) làm f_1 thấp hơn, còn việc lọc nhánh tụ thủy theo ngưỡng diện tích tụ (25 m^2) thay vì giữ toàn bộ nhánh tụ thủy mịn như KB1 làm tổng chiều dài rãnh ít hơn. Hiệu quả vì vậy chủ yếu đến từ khoảng cách Δh giữa các rãnh ngang. Điểm gấp khúc ở Bảng 5 là nghiệm (Δh = 5 m; acc_{thr} = 200 m^2): từ nghiệm (Δh = 8 m; acc_{thr} = 10 m^2) lên điểm này, thêm 393 m rãnh làm f_1 giảm 8,5 điểm phần trăm; từ điểm này lên KB2, thêm 1.945 m rãnh chỉ làm f_1 giảm 1,6 điểm phần trăm.

Bảng 5. Các nghiệm tiêu biểu trên mặt Pareto (9 trong 21 nghiệm) tại i = 180 mm/h

Δh (m)	acc_{thr} (m^2)	f_1 (%)	f_2 (m)	Ghi chú
5	10	14,4	10.186	KB2, f_1 nhỏ nhất
5	25	15,4	9.009	
5	200	16,0	8.241	Điểm gấp khúc
8	10	24,5	7.848	
8	25	26,2	6.651	Ít rãnh hơn KB1 (6.864 m), f_1 thấp hơn KB1
10	25	34,7	5.263	
15	25	42,7	3.930	
20	50	48,1	2.971	
20	200	48,9	2.520	f_2 nhỏ nhất



Hình 6. Mặt Pareto hai mục tiêu của 25 tổ hợp tham số theo bốn cấp cường độ mưa

4.4. Thảo luận

Hiệu quả theo dải cường độ mưa: Tại cấp cường độ thấp nhất i = 90 mm/h, KB2 chỉ còn 4,9% diện tích vượt ngưỡng xói, mạng rãnh kiểm soát hầu hết diện tích xói bề mặt ở cấp mưa này. Ngược lại, tại cấp i = 180 mm/h vẫn còn 14,4% diện tích vượt ngưỡng; tỷ lệ vượt ngưỡng tăng theo độ dốc, từ 6,0% ở lớp dốc dưới 30° đến 39,4% ở lớp dốc trên 60°, vì ở dốc lớn ngay cả màng nước mỏng cũng sinh ứng suất cắt vượt τ_{allow} = 10 Pa.

Hạn chế và hướng phát triển: Nghiên cứu có các hạn chế sau. Thứ nhất, tối ưu hóa được thực hiện theo một cấp cường độ duy nhất (i = 180 mm/h). Thứ hai, mô hình giả thiết rãnh hấp thụ hoàn toàn và có đủ năng lực thoát, chưa mô phỏng khả năng tải, tràn rãnh và tập trung dòng tại điểm xả. Thứ ba, kết quả mới được kiểm nghiệm trên một mái dốc đơn lẻ và chưa có đối chứng thực địa; cần đo xói trước–sau và hiệu chỉnh ngược các tham số n, C, τ_{allow}. Thứ tư, thời gian tập trung nước tính được (0,4–1,2 phút) ngắn hơn thời đoạn nhỏ nhất của số liệu mưa (10 phút), nên cường độ mưa ứng với thời đoạn ngắn hơn có thể lớn hơn các cấp đã khảo sát; cần xây dựng phương trình cường độ mưa từ số liệu đo của khu vực, theo cách đã thực hiện cho trạm Hà Đông [26]. Thứ năm, độ chính xác cao độ của DTM chưa được kiểm tra bằng điểm khống chế độc lập vì số liệu khảo sát không có thông tin này. Thứ sáu, hệ số an toàn của mái chưa được tính; có thể kết hợp kết quả thu gom nước mặt với phân tích ổn định mái bằng phương pháp phân tích giới hạn [27].

Độ nhạy theo tham số mô hình: Giá trị tuyệt đối của f_1 phụ thuộc mạnh vào các tham số bề mặt. Tại 180 mm/h, f_1 của KB0 thay đổi từ 47,8% (C = 0,4) đến 69,8% (C = 0,85) khi thay đổi C, từ 41,0% (n = 0,03) đến 81,8% (n = 0,15) khi thay đổi n, và còn 13,0% khi τ_{allow} = 29 Pa. Vì vậy f_1 được dùng để so sánh tương đối giữa các phương án, không dùng để dự báo diện tích xói. Thứ tự các phương án và thứ hạng của 25 tổ hợp không đổi theo các tham số này (hệ số Spearman ≥ 0,99); số nghiệm không bị trội là 21/25 ở mọi biến thể (18/25 khi τ_{allow} = 48 Pa) và tổ hợp tốt nhất luôn là (Δh = 5 m; acc_{thr} = 10 m^2).

Kiểm chứng mô hình: Mô hình được kiểm chứng theo ba hướng. Thứ nhất, kiểm tra cài đặt trên mặt phẳng dốc đều 20°, 30° và 45° dài 68 m, i = 120 mm/h: τ và t_c do mô hình tính trùng với nghiệm giải tích (τ = 17,9; 24,7 và 36,3 Pa). Trên mặt phẳng 30° có rãnh đặt giữa mái, L_{up} bằng 34,0 m ngay trước rãnh, bằng 0 ngay sau rãnh và bằng 33,0 m ở chân mái (giá trị kỳ vọng 33,5 m). Thứ hai, kiểm tra cách tính lưu lượng: khi tính q theo diện tích tụ riêng $a = A/b$, vốn bảo toàn lượng nước tại các nhánh hội tụ, thay cho L_{up}, f_1 của KB0, KB1 và KB2 tại 180 mm/h là 61,4%; 31,2% và 14,9%, so với 63,0%; 31,2% và 14,4%, nên cách tính theo L_{up} không làm thay đổi kết luận so sánh các phương án. Về bảo toàn lượng nước, tổng lưu lượng mạng rãnh thu về tại 180 mm/h là 1,64 m^3/s (KB1) và 1,70 m^3/s (KB2), so với lưu lượng mưa hiệu quả trên toàn mái $C \cdot i \cdot S$ = 1,62 m^3/s (chênh +1% và +5%, liên quan đến dòng chảy từ thượng lưu ngoài ranh mái được tính vào lưới). Với mặt nạ rãnh liên thông 4 hướng, không cho dòng D8 đi chéo lọt qua rãnh, f_1 của KB1 và KB2 giảm còn 25,8% và 6,7% (so với 31,2% và 14,4% ở mặt nạ liên thông 8 hướng dùng trong bài), nên hiệu quả của rãnh trong các kết quả là ước lượng thận trọng. Thứ ba, kiểm tra độ phân giải: khi thay DEM 0,5 m bằng DEM 1 m và 2 m, f_1 của KB0 gần như không đổi (63,0%; 62,9%; 62,9%) và L_{up} lớn nhất giảm từ 185,9 m xuống 177,0 m và 175,3 m, trong khi phân vị 99% của τ giảm từ 105,9 Pa xuống 74,0 Pa ở DEM 2 m. Vì vậy f_1 ổn định theo độ phân giải còn các giá trị cực đại và phân vị cao thì không. Các kiểm tra này xác nhận cài đặt đúng và kết quả so sánh ổn định, nhưng chưa phải kiểm chứng độc lập về độ chính xác tuyệt đối của τ, vì τ và t_c cùng phụ thuộc L_{up} và độ dốc. Việc đối chiếu với đo xói trước–sau sẽ được thực hiện khi áp dụng giải pháp tại hiện trường.

5. Kết luận

Bài báo đề xuất giải pháp giảm nguy cơ mất ổn định mái dốc bằng thu gom nước mặt: bố trí mạng rãnh thoát nước mặt bám địa hình trên mô hình số độ cao. Các giải pháp ổn định mái hiện nay chủ yếu tập trung vào gia cố cơ học, trong khi giải pháp này tác động trực tiếp vào nước, tác nhân kích hoạt mất ổn định, thông qua hai cơ chế là thấm và xói bề mặt. Mạng rãnh gồm rãnh ngang bám đường đồng mức và rãnh dọc bám đường tụ thủy, được tạo tự động từ DEM và lựa chọn theo mặt Pareto giữa hiệu quả thu gom và tổng chiều dài rãnh. Mô hình số được dùng để kiểm tra giải pháp trên mái taluy tự nhiên phủ thực vật dày tại phường Cam Đường, tỉnh Lào Cai (5,0 ha, độ dốc trung bình 35°): khi mái có hệ thống rãnh bố trí hợp lý, lượng nước trên mái giảm đúng như giải pháp đề xuất.

- Tại cấp cường độ cực trị $i = 180$ mm/h, so với mái không rãnh, mạng rãnh KB2 (f_1 nhỏ nhất) rút ngắn chiều dài chảy tràn tích lũy cực đại 71,4% (185,9 → 53,2 m), giảm 48,6 điểm phần trăm diện tích mái có ứng suất cắt vượt ngưỡng xói (63,0% → 14,4%) và rút ngắn thời gian tập trung nước trung bình từ 0,9 xuống 0,4 phút. Nước trên mái vì vậy ít hơn, tồn tại ngắn hơn và mức xói giảm rõ rệt. Điều này được kỳ vọng hạn chế lượng nước thấm vào thân đất, giảm nguy cơ bão hòa cục bộ và nguy cơ hệ số an toàn bị suy giảm khi mưa; mức giảm thấm và hệ số an toàn chưa được định lượng trong nghiên cứu này.

- Phân tích mặt Pareto cho thấy khoảng cách cao độ giữa các rãnh ngang là tham số chi phối hiệu quả; có nghiệm dùng ít rãnh hơn phương án tham số mặc định (KB1) nhưng có tỷ lệ diện tích vượt ngưỡng thấp hơn. Người thiết kế có thể chọn phương án trong tập nghiệm không bị trội (21/25) theo yêu cầu của từng mái. Thu gom nước mặt bằng mạng rãnh bám địa hình vì vậy là giải pháp có hiệu quả, cần được xem xét trong thiết kế ổn định mái dốc lớn có địa hình phức tạp, bên cạnh gia cố cơ học. Giải pháp sẽ được áp dụng trên mái thực tế để kiểm nghiệm hiệu quả ngoài hiện trường.

Lời cảm ơn

Các tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài "Nghiên cứu giải pháp bố trí rãnh thoát nước mặt bám địa hình trên mô hình số độ cao nhằm nâng cao ổn định mái dốc", mã số CĐ-2025-15.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng Claude để cải thiện khả năng diễn đạt của bản thảo. Tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, New York, NY.

[2] Highland, L. M., Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook—A guide to understanding landslides (version 1.0)*. U.S. Geological Survey Circular 1325, U.S. Geological Survey, Reston, VA.

[3] Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability*. 2nd edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

[4] Hearn, G. J., editor (2011). *Slope engineering for mountain roads*. Number 24 in Engineering Geology Special Publication, Geological Society, London.

[5] Huang, Y., He, Z. (2023). Rainfall-oriented resilient design for slope system: Resilience-enhancing strategies. *Soils and Foundations*, 63(2):101297.

[6] Kilgore, R. T., Cotton, G. K. (2005). *Design of roadside channels with flexible linings (Hydraulic Engineering Circular No. 15, HEC 15, 3rd ed.)*. Report FHWA-NHI-05-114, Federal Highway Administration, Washington, DC.

[7] TCVN 4054:2005. *Đường ô tô – Yêu cầu thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[8] FAO (1988). *Watershed management field manual: Slope treatment measures and practices*. FAO Conservation Guide 13/3, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
[9] Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation*. 3rd edition, Wiley-Blackwell, Oxford.
[10] Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture, Maryland.
[11] Palominos-Rizzo, T., Villatoro-Sánchez, M., Paguada-Pérez, D., Alvarado-Hernández, A., Cortés-Granados, V., Marín-Araya, S. (2024). Effect of staggered contour trenches and hillside ditches on surface runoff and soil loss on steep slopes in shaded coffee (*Coffea arabica*), Costa Rica. *Soil Security*, 14: 100128.
[12] O'Callaghan, J. F., Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3):323–344.
[13] Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2):309–319.
[14] Beven, K. J., Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1):43–69.
[15] Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1):3–30.
[16] Seyedashraf, O., Bottacin-Busolin, A., Harou, J. J. (2021). Many-objective optimization of sustainable drainage systems in urban areas with different surface slopes. *Water Resources Management*, 35(8): 2449–2464.
[17] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2):182–197.
[18] Widodo, L. E., Cahyadi, T. A., Syihab, Z., Notosiswoyo, S., Iskandar, I., Rustamaji, H. C. (2018). Development of drain hole design optimisation: A conceptual model for open pit mine slope drainage system with fractured media using a multi-stage genetic algorithm. *Environmental Earth Sciences*, 77(20):721.
[19] Isenhower, W. M. (1988). Considerations for stabilizing drained failures of slopes. *Transportation Research Record*, 1192:70–78.
[20] Crenshaw, B. A., Santi, P. M. (2004). Water table profiles in the vicinity of horizontal drains. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(3):191–201.
[21] Montgomery, D. R. (1994). Road surface drainage, channel initiation, and slope instability. *Water Resources Research*, 30(6):1925–1932.
[22] Bar, N., Kostadinovski, M., Tucker, M., Byng, G., Rachmatullah, R., Maldonado, A., Pötsch, M., Gaich, A., McQuillan, A., Yacoub, T. (2020). Rapid and robust slope failure appraisal using aerial photogrammetry and 3D slope stability models. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(5): 651–658.
[23] Kim, N., Macciotta, R., Jun, B. (2024). Time series analysis of slope displacements using UAV photogrammetry and its relationship with rainfall intensity. *Landslides*, 21(7):1673–1689.
[24] QCVN 02:2022/BXD. *Số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng*. Bộ Xây dựng, Việt Nam.
[25] Temple, D. M., Robinson, K. M., Ahring, R. M., Davis, A. G. (1987). *Stability design of grass-lined open channels*. Agriculture Handbook No. 667, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC.
[26] Anh, H. X., Nga, T. T. V., Nam, N. V. (2025). Developing a design rainfall intensity equation using measurement data from the Ha Dong meteorological station in Hanoi, Vietnam. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 19(1):47–58.
[27] Thien, V. M. (2023). The upper bound limit analysis of slope in cohesive-frictional soils using the node-based smoothed finite element method. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 17(3):140–153.