

ĐÁNH GIÁ NGUY CƠ XUẤT HIỆN SÓNG THẦN DO KHỐI TRƯỢT TIỀM NĂNG TẠI KHU VỰC HỒ CHỨA NƯỚC VẠN HỘI, TỈNH BÌNH ĐỊNH

Phạm Văn Tiền^{1,2,*}, Lê Hồng Lượng³, Trần Thanh Nhân⁴, Trần Trung Hiếu², Đinh Thị Quỳnh¹, Nguyễn Khắc Hoàng Giang⁵, Đào Minh Đức², Nguyễn Thành Dương⁶, Đỗ Minh Ngọc¹, Phạm Huy Dũng⁷

¹Viện Địa công nghệ và môi trường; ²Viện Địa chất - Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam; ³Viện Khoa học và công nghệ Giao thông vận tải; ⁴Trường Đại học khoa học - Đại học Huế

⁵Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội; ⁶Trường Đại học Mở - Địa chất;

⁷Trường Đại học Thủy Lợi

*Tác giả chịu trách nhiệm: phamtiengvt@gmail.com

Tóm tắt

Trượt lở tại khu vực hồ và đập chứa nước không chỉ gây ra các mối đe dọa tới con người và cơ sở hạ tầng hồ đập, mà sự hình thành trượt còn có thể gây ra các tai biến thứ cấp khác như sóng thần, chảy tràn đỉnh đập, hay vỡ đập gây lũ lụt tại vùng hạ lưu. Sự kiện trượt lở do mưa lớn gây ra sóng thần tại hồ chứa nước Vạn Hội xảy ra vào năm 2016 đã đặt ra một vấn đề mới cần thiết phải nghiên cứu tại Việt Nam. Hiện nay, trượt lở có nguy cơ cao sẽ tiếp tục xảy ra do mưa lớn tại sườn dốc phía đối diện với đập Vạn Hội. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu nguy cơ xuất hiện sóng thần do trượt lở sử dụng thử nghiệm cắt vòng và mô hình mô phỏng tích hợp LS-RAPID và LS-TSUNAMI. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khối trượt tiềm năng có thể xuất hiện do mưa lớn khi hệ số áp lực nước lỗ rỗng tới hạn đạt giá trị $r_{uc} = 0,63$. Trong mô phỏng máy tính, khối trượt dịch chuyển nhanh với vận tốc khoảng 21 m/s vào trong lòng hồ gây sóng thần trong hồ với chiều cao 7,6 m. Sóng nước với chiều cao từ 5,0 đến 5,4 m tràn qua đỉnh đập và gây tác động đến khu vực thân đập phía hạ lưu. Kết quả nghiên cứu này có ý nghĩa trong việc dự báo sự xuất hiện trượt lở và đề xuất các giải pháp ứng phó với kịch bản trượt lở gây sóng thần có thể xuất hiện trong điều kiện mưa lớn tại hồ Vạn Hội.

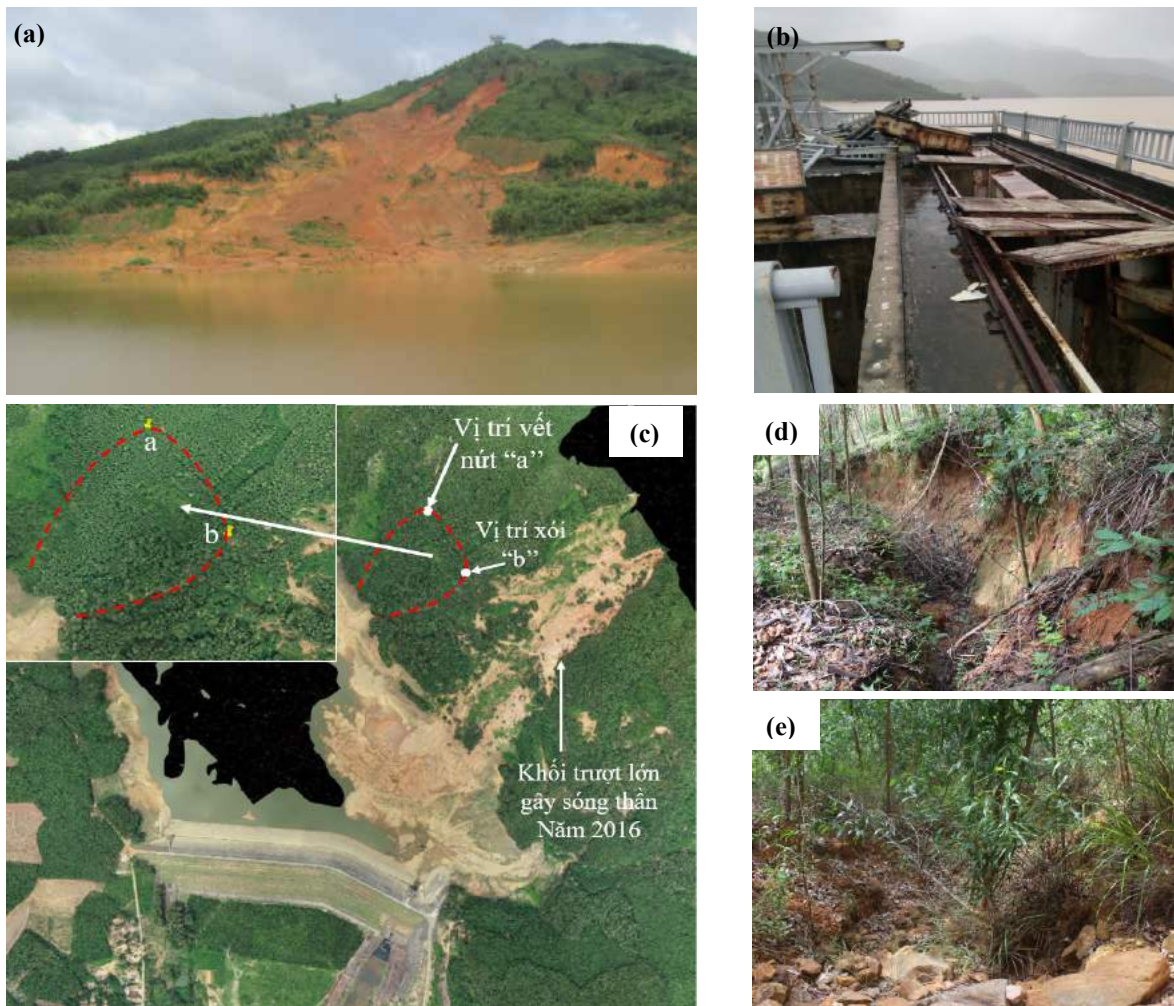
Từ khóa: trượt lở; sóng thần; mô hình LS-RAPID và LS-TSUNAMI; áp lực nước lỗ rỗng; hồ chứa nước Vạn Hội.

1. Giới thiệu chung

Trượt lở là một trong những tai biến địa chất nguy hiểm gây ra nhiều thiệt hại về kinh tế và sinh mạng con người. Trong khoảng hai thập kỷ gần đây tại Việt Nam, trượt lở đã và đang xuất hiện thường xuyên hơn vào mùa mưa bão ở các khu vực đồi núi (Tien và nnk., 2016; Luong và nnk., 2017; Tien và nnk., 2021a, 2021b và 2021c). Tại các khu vực hồ và đập chứa nước (gọi tắt là hồ đập), trượt lở không chỉ gây ra những thiệt hại về tài sản và sinh mạng con người mà có thể gây ra các tai biến thứ cấp và hình thành chuỗi thảm họa trượt lở - sóng thần - chảy tràn đỉnh đập - vỡ đập - lũ lụt hạ lưu (Korup, 2005). Nhiều sự kiện liên quan tới trượt lở hồ đập đã xảy ra trên thế giới, như trượt lở quy mô lớn gây ra sóng thần trong hồ Vajont lấy đi khoảng 2.000 sinh mạng ở Italy năm 1963 (Iqbal và nnk., 2017) hay khối trượt Qianjiangping gây sóng thần trong lòng hồ Tam Hiệp, Trung Quốc làm chết 24 người năm 2003 (Wang và nnk., 2008). Trượt lở vào trong lòng hồ có thể tạo ra sóng thần đe dọa sự an toàn kết cấu đập và vùng hạ lưu. Đã có nhiều nghiên cứu đánh giá về vấn đề trượt lở gây sóng thần, cụ thể là việc xác định các thông số sóng nước (như vận tốc, chiều cao, điểm tác động cao nhất ở khu vực bờ, vùng tác động của sóng và thời gian truyền sóng) thông qua lý thuyết toán học (Kranzer và Keller, 1960), thử nghiệm mô phỏng vật lý (Panizzo và nnk., 2005) và mô phỏng số (Duc và nnk., 2020).

Việt Nam có hơn 7.000 hồ và đập chứa nước trên cả nước, trong đó có khoảng 750 công trình có quy mô trung bình đến lớn (Tien và nnk., 2023). Tai biến trượt lở đã xuất hiện và gây ra những tác động khác nhau tại nhiều khu vực hồ đập như hồ Thủy điện Hòa Bình, hồ Thủy điện Lai Châu, hồ Thủy điện Sơn La, hồ Thủy điện Bản Vẽ, hồ Thủy điện Nậm Nơn, hồ Thủy điện Bản Áng, hồ Thủy điện Hương Điền, hồ chứa nước Vạn Hội và hồ chứa nước Cửa Đạt (Tien và nnk., 2022). Như một

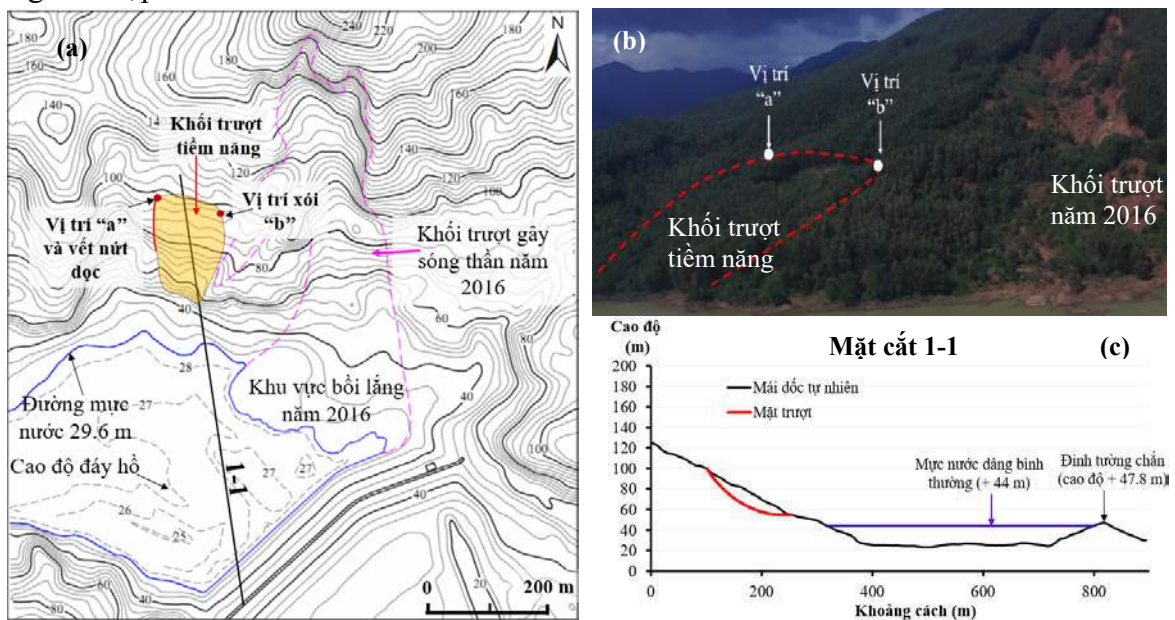
ví dụ điển hình, trượt lở tại nhiều vị trí sườn dốc trong lòng hồ chứa nước Vạn Hội xuất hiện vào ngày 16 tháng 12 năm 2016 sau các trận mưa lớn và kéo dài trong tháng 11 và tháng 12 (hình 1a). Đáng chú ý, trận mưa lớn đã kích hoạt khối trượt sâu và quy mô lớn tại sườn dốc phía đối diện đập và nhà vận hành của hồ Vạn Hội, gây ra sóng thần cao khoảng 20 m tàn phá công trình đập (hình 1b). Khối trượt quy mô lớn này có thể tích khoảng 583.000 m³, với chiều dài 400 m, chiều rộng 145 m và chiều sâu 27 m (Tien và nnk., 2023). Khối trượt lớn lan rộng dưới mặt nước và lắng đọng kéo dài hơn 400 m dọc đáy hồ, bao gồm cả khu vực trước cửa tràn của đập Vạn Hội (hình 1c). Sóng thần gây ra do trượt lở đánh trúng vào tràn xả lũ, làm hỏng toàn bộ công trục, phai phụ, lan can và gây hỏng hoàn toàn đường ống dẫn dầu thủy lực cửa tràn số 03, làm cho cửa tràn đóng sập xuống không kéo lên được. Sóng nước sau đó vượt qua đỉnh đập, làm gãy 02 trụ điện, làm nứt 05 trụ và phá hủy một số vị trí taluy kè thân đập phía hạ lưu. Đồng thời nước phủ tràn qua nhà quản lý tràn đã làm hỏng tụt áp máy phát điện dự phòng. Ngoài ra, khi nước tràn qua đỉnh đập và nhà quản lý tràn đã làm xói lở mái thượng hạ lưu đập khoảng 200 m³ đất đắp, 250 m³ đá xây và 600 m³ đá lát đồng đá tiêu nước hạ lưu (Nguyễn Văn Phú, 2019).



Hình 1. (a) Khối trượt quy mô lớn gây sóng thần năm 2016, (b) Sóng thần gây phá hoại công trình nhà vận hành hồ Vạn Hội, (Ảnh chụp bởi Th.S Đỗ Cảnh Hào), (c) Ảnh UAV trượt lở khu vực hồ Vạn Hội, (d) Vết nứt hình thành vách trượt tiềm năng và (e) Rãnh xói trên sườn dốc.

Hồ chứa nước Vạn Hội có dung tích thiết kế 14,5 triệu m³ nước, xây dựng trên lưu vực suối Cái (phụ lưu của sông An Lão) có diện tích khoảng 38 km². Hồ Vạn Hội đóng vai trò rất quan trọng trong việc cung cấp nước tưới cho một khu vực đất nông nghiệp rộng lớn khoảng 2.106 hecta của huyện Hoài Ân. Công trình này cũng thực hiện chức năng bổ sung khoảng 5,0 triệu mét khối nước cho hệ thống đập Lại Giang. Khu vực hồ Vạn Hội nằm ở rìa phía Nam địa khối Kontum chịu ảnh hưởng mạnh mẽ bởi các hoạt động kiến tạo. Địa tầng khu vực sườn dốc đối

diện đập được cấu tạo bởi đá biến chất gneis thuộc hệ tầng Kim Sơn. Trượt lở được hình thành trong lớp vỏ phong hóa hoàn toàn từ đá gneis. Sự cố trượt lở và sóng thần tại hồ Vạn Hội vào tháng 12 năm 2016 đã gây thiệt hại lớn về kinh tế và làm ảnh hưởng nghiêm trọng đến các hoạt động vận hành của công trình đập. Sau sự cố trượt lở gây sóng thần năm 2016, trầm tích trượt lở gây bồi lắng lòng hồ vẫn chưa được xử lý do hạn chế về nguồn kinh phí. Chức năng vận hành của hồ Vạn Hội bị ảnh hưởng nghiêm trọng vào mùa khô do sự suy giảm thể tích trữ nước. Nguy cơ trượt lở trên sườn dốc lòng hồ vẫn luôn thường trực vào mùa mưa. Mặc dù vậy, nghiên cứu trượt lở khu vực hồ chứa nước Vạn Hội vẫn chưa được thực hiện đầy đủ. Theo kết quả khảo sát hiện trường gần đây, trên sườn dốc phía bên phải của khối trượt lớn năm 2016 xuất hiện một vết nứt kéo dài khoảng 50 m, hình thành một vết sụt lún sâu khoảng 1,5 m và nứt tách giống như một vách trượt của khối trượt tiềm năng (vị trí “a” trên hình 1d, 2a và 2b). Phía bên trái của khu vực này tồn tại một vị trí xói trên bề mặt (vị trí “b” trên hình 1e, 2a và 2b). Đây là những dấu hiệu cho thấy sườn dốc này có nguy cơ cao xảy ra trượt lở với chiều sâu mặt trượt dự đoán khoảng 10 đến 20 m. Hình 2c thể hiện mặt cắt ngang khối trượt được ước tính dựa vào chức năng tạo mặt trượt trong phần mềm LS-RAPID. Việc nghiên cứu, đánh giá nguy cơ xuất hiện trượt lở và các tai biến thứ cấp khác ở khu vực hồ Vạn Hội là rất cần thiết. Bài báo này trình bày kết quả đánh giá nguy cơ hình thành khối trượt tiềm năng do mưa lớn và khả năng xuất hiện sóng thần trong hồ Vạn Hội sử dụng thử nghiệm cắt vòng trên thiết bị ICL-2 và mô hình mô phỏng tích hợp LS-RAPID và LS-TSUNAMI.

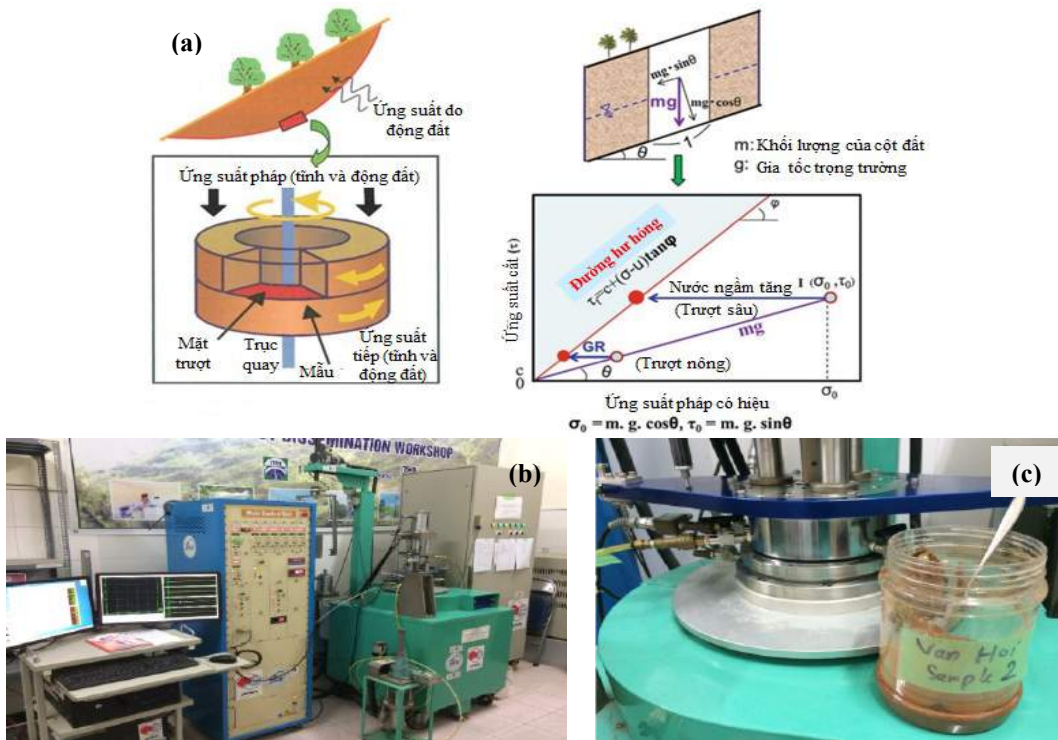


Hình 2. Bình đồ thể hiện khối trượt lớn khu vực hồ Vạn Hội và mặt cắt ngang khối trượt tiềm năng.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện bằng việc kết hợp các phương pháp khác nhau gồm, khảo sát thực địa chi tiết, thu thập mẫu đất, thí nghiệm cắt vòng mô phỏng trượt lở gây ra do mưa và mô hình số trên máy tính sử dụng phần mềm LS-RAPID và LS-TSUNAMI. Thiết bị bay không người lái (UAV) Phantom-4 Professional được sử dụng để khảo sát tổng thể khu vực nghiên cứu và chụp ảnh để xây dựng dữ liệu địa hình khu vực nghiên cứu phục vụ phân tích và mô phỏng số. Để nghiên cứu mô phỏng kịch bản trượt lở do mưa xảy ra tại hồ Vạn Hội, các mẫu đất được thu thập tại mặt trượt của khối trượt lớn gây sóng thần năm 2016 được thí nghiệm xác định các chỉ tiêu động lực học dùng cho mô phỏng máy tính. Mẫu đất S2, là vật liệu phong hóa hoàn toàn từ đá gốc gneis trong khu vực hồ Vạn Hội được sử dụng trong nghiên cứu khối trượt tiềm năng. Mẫu S2 được xác định là nguyên nhân chính góp phần hình thành sự dịch trượt với tốc độ nhanh gây ra sóng thần (Tien và nnk., 2023).

Thiết bị cắt vòng tải trọng động áp lực lớn (undrained dynamic loading ring shear apparatus, ICL-2) được sử dụng trong nghiên cứu này để khảo sát cơ chế trượt sâu do mưa lớn (hình 3). Đây là thiết bị được phát triển trong khuôn khổ dự án hợp tác quốc tế giữa Việt Nam và Nhật Bản mà khả năng duy trì thí nghiệm ở điều kiện không thoát nước ở áp lực 3,0 MPa. Thiết bị ICL-2 cho phép nghiên cứu cường độ dư của mẫu đất do khả năng điều khiển theo chế độ cắt chuyển vị không giới hạn, và theo dõi sự thay đổi của áp lực nước lỗ rỗng dưới các điều kiện tải trọng tĩnh và động lực trong điều kiện không thoát nước. Nguyên lý cơ bản của thiết bị cắt vòng là để mô phỏng các ứng suất do trọng lực, lực động đất, hoặc áp lực nước lỗ rỗng lên mẫu đất lấy tại hiện trường và để theo dõi sự biến đổi của các thông số trượt lở trong quá trình thí nghiệm như sự hình thành mặt trượt, sự hóa lỏng vật liệu tại mặt trượt, sự phát sinh áp lực nước lỗ rỗng, các quá trình trước và sau trượt (Sassa và nnk., 2010). Thí nghiệm cắt vòng đều được tiến hành trên mẫu đất đã bão hòa hoàn toàn với độ bão hòa (BD) lớn hơn hoặc bằng 0,95. Giá trị (BD) được tính toán như hệ số giữa sự gia tăng của áp lực nước lỗ rỗng và sự gia tăng của ứng suất pháp trong điều kiện không thoát nước (Tien và nnk., 2018). Trạng thái ứng suất mô phỏng điều kiện ban đầu của mái dốc được tính toán dựa vào chiều sâu khối trượt (h), góc dốc tự nhiên (θ) và trọng lượng đơn vị của mẫu đất (γ), bao gồm ứng suất pháp ($\delta_0 = \gamma \cdot h \cdot \cos^2\theta$) và ứng suất tiếp ($\tau_0 = \gamma \cdot h \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta$). Mô tả chi tiết về thiết bị ICL-2 và chu trình thí nghiệm được trình bày qua nhiều tài liệu của giáo sư Sassa (Sassa và nnk., 2010).



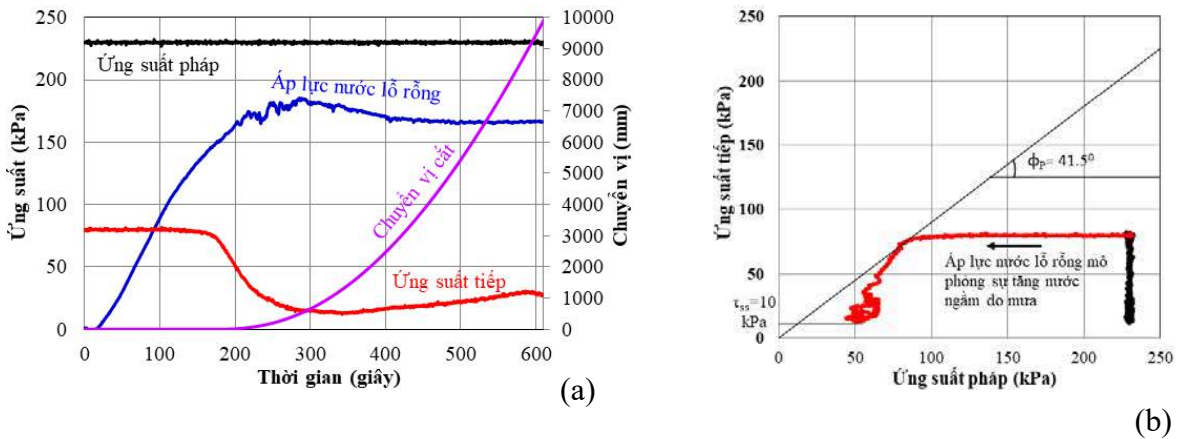
Hình 3. (a) Nguyên lý mô phỏng cắt vòng và cơ chế hình thành trượt lở do mưa, (b) Hệ thống mô phỏng cắt vòng ICL-2, và (c) Ảnh thí nghiệm mẫu đất trượt lở hồ Vạn Hội

Từ thí nghiệm cắt vòng, các thông số được lựa chọn cho mô hình mô phỏng trượt lở do mưa trên máy tính sử dụng mô hình LS-RAPID. Đây là mô hình được phát triển bởi giáo sư Sassa và các cộng sự nhằm mô phỏng toàn bộ quá trình hình thành trượt lở, từ trạng thái ổn định, giai đoạn phát sinh hư hỏng (hình thành trượt lở), và quá trình dịch chuyển của khối trượt. Trong mô phỏng khối trượt gây ra do mưa, hệ số áp lực nước lỗ rỗng (r_u) được tăng dần đến giá trị tới hạn mà sự dịch chuyển của mái dốc xảy ra, giá trị tới hạn này được xác định trong thí nghiệm cắt vòng. Tiếp theo, đánh giá nguy cơ trượt lở gây sóng thần được thực hiện trong mô hình LS-TSUNAMI (Sassa và nnk., 2016). Kết quả mô phỏng trượt lở là thông số đầu vào để mô phỏng hiện tượng sóng thần phát sinh do sự dịch chuyển nhanh của khối đất đá di chuyển xuống mặt hồ.

3. Kết quả nghiên cứu đánh giá nguy cơ sóng thần gây ra do trượt lở

3.1. Mô phỏng trượt lở gây ra do mưa sử dụng thiết bị cắt vòng

Trong thí nghiệm mô phỏng trượt xảy ra do mưa trên mẫu S2, giá trị ứng suất pháp $\sigma_0 = 230$ kPa và ứng suất tiếp $\tau_0 = 90$ kPa được gia tăng trong điều kiện thoát nước. Đây là trạng thái ứng suất gần tương ứng với điều kiện tự nhiên của sườn dốc ban đầu. Giá trị áp lực nước lỗ rỗng được gia tăng dần với tốc độ không đổi 1 kPa/giây đến khi mẫu đất bị phá hủy (hình thành trượt). Thí nghiệm được thực hiện tới khi chuyển vị cắt đạt giá trị 10 mm. Kết quả thí nghiệm cắt do sự gia tăng áp lực nước lỗ rỗng được thể hiện trong Hình 4. Kết quả thí nghiệm ghi nhận, góc ma sát tại đỉnh (friction angle at peak) là $42,8^\circ$, sức kháng cắt dư đạt giá trị 10 kPa (hình 4b). Giá trị áp lực nước lỗ rỗng cần thiết để kích hoạt sự dịch chuyển đo được là 150 kPa, tương ứng với hệ số áp lực nước lỗ rỗng tới hạn (critical pore water pressure ratio) là $r_u = 0,65$ ($150/230$). Khối trượt sau đó chuyển dịch nhanh dần do sự tăng đột ngột của áp lực lỗ rỗng dư kết hợp với sự suy giảm đột ngột của cường độ cắt.



Hình 4. Thử nghiệm mô phỏng trượt lở do mưa trên mẫu đất S2: (a) Biểu đồ biểu thị các giá trị ứng suất và chuyển vị được quan trắc theo thời gian và (b) biểu đồ đường ứng suất.

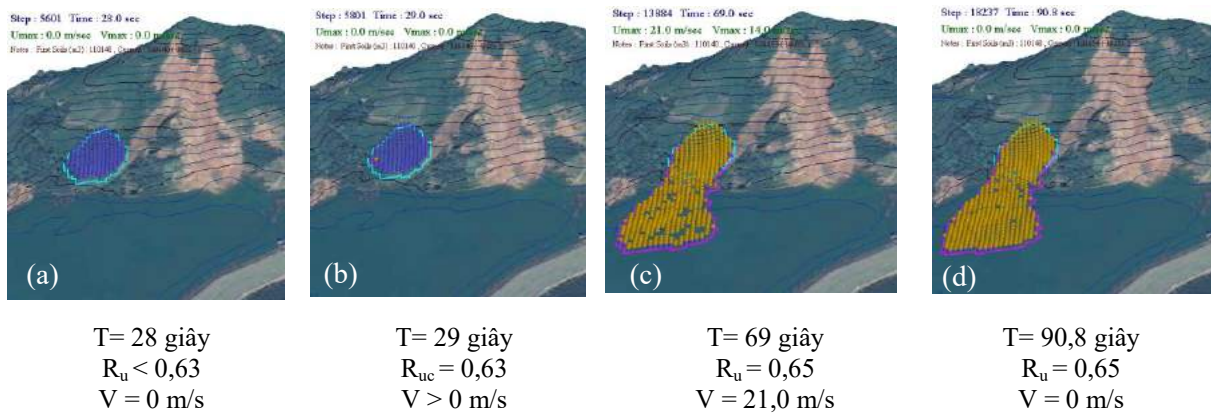
3.2. Mô hình số mô phỏng trượt lở gây ra do mưa sử dụng mô hình LS-RAPID

Quá trình hình thành khối trượt tiềm năng được mô phỏng sử dụng mô hình LS-RAPID. Trong mô hình LS-RAPID, dữ liệu địa hình độ phân giải 5-m của khu vực hồ Vạn Hội được xây dựng từ ảnh chụp UAV được sử dụng trong tính toán. Trong khi đó, vùng phát sinh khối trượt tiềm năng được tạo ra bằng cách sử dụng công cụ xây dựng mặt trượt dạng elip, với thể tích khoảng 110.000 m^3 . Các thông số kháng cắt của mẫu đất mặt trượt trong mô hình LS-RAPID được đo từ thí nghiệm cắt vòng đã được trình bày trong nghiên cứu cơ chế trượt lở khối trượt lớn gây sóng thần năm 2016 (Tiền và nnk., 2023). Giá trị sức kháng cắt dư tại trạng thái ổn định $\tau_{ss} = 10$ kPa và hệ số áp lực nước lỗ rỗng $r_u = 0,65$ được xác định từ thí nghiệm cắt vòng mô phỏng trượt lở do mưa trong nghiên cứu này. Giá trị các thông số đầu vào của mô hình máy tính được trình bày chi tiết trong bảng 1. Trong mô hình máy tính, hệ số áp lực nước lỗ rỗng được tăng từ 0 đến giá trị 0,65 trong khoảng thời gian 30 giây, sau đó được giữ không đổi trong khoảng thời gian 120 giây.

Bảng 1. Thông số đầu vào của mô hình số LS-RAPID

Các thông số mô phỏng trượt lở	Giá trị
Trọng lượng đơn vị của mẫu đất (γ_t , kN/m ³)	20,1
Trọng lượng đơn vị của nước (γ_w , kN/m ³)	9,81
Hệ số áp lực hông ($k = \sigma_H / \sigma_v$)	0,5 - 0,85
Tốc độ phát sinh áp lực nước lỗ rỗng (B_{ss})	0,9 - 0,98
Góc ma sát trong quá trình dịch chuyển ($\tan \phi_m$, độ)	38,5
Góc ma sát đỉnh ($\tan \phi_p$, độ)	41,5
Sức kháng cắt dư (τ_{ss} , kPa)	10
Chuyển vị cắt tại thời điểm bắt đầu suy giảm cường độ cắt (D_L , mm)	9
Chuyển vị cắt tại thời điểm kết thúc suy giảm cường độ cắt (D_U , mm)	500
Hệ số áp lực nước lỗ rỗng (r_u)	0,65

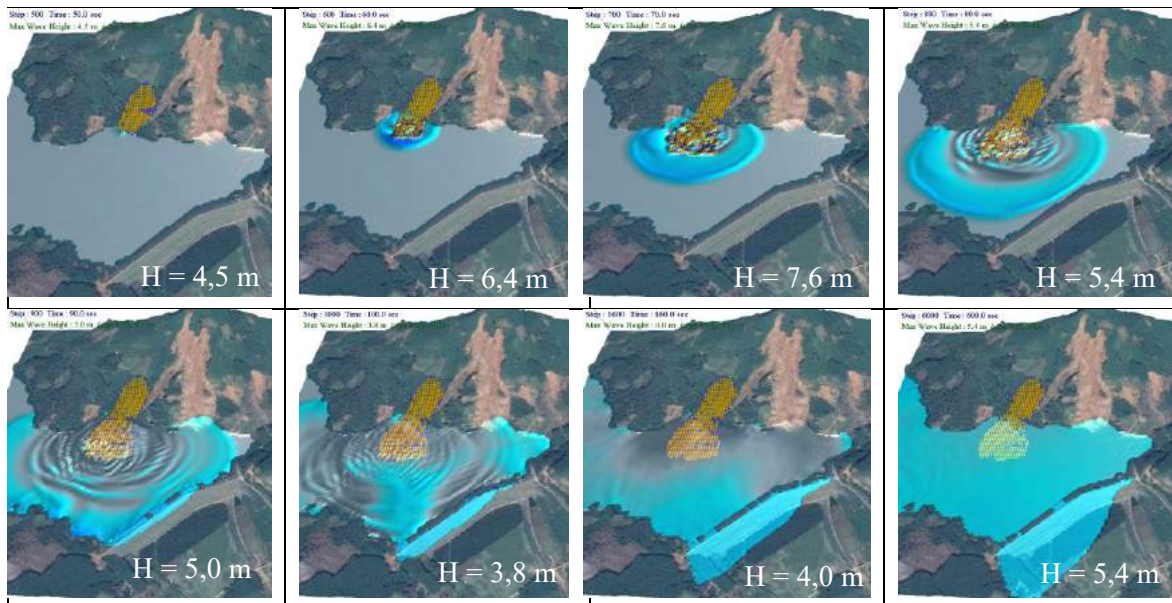
Hình 5 biểu thị kết quả mô phỏng quá trình hình thành và dịch chuyển của khối trượt tiềm năng kích hoạt bởi sự gia tăng áp lực nước lỗ rỗng gây ra do sự tăng mực nước ngầm trong điều kiện mưa lớn. Sườn dốc vẫn ổn định khi hệ số áp lực nước lỗ rỗng nhỏ hơn 0,63 (chấm tròn màu xanh, hình 5a). Sườn dốc xuất hiện phá hủy cục bộ (chấm tròn màu cam) tại khu vực gần vết nứt và phía chân mái dốc khi giá trị tới hạn $r_{uc} = 0,63$ (hình 5b). Sự phá hủy sau đó tiếp tục lan rộng ra toàn mái dốc khi áp lực nước lỗ rỗng gia tăng và được giữ không đổi ở giá trị 0,65. Khối trượt dịch chuyển xuống dưới lòng hồ với vận tốc tăng dần và đạt giá trị lớn nhất $v = 21$ m/s (hình 5c). Ở giai đoạn sau dịch chuyển, vận tốc dịch trượt giảm dần và dừng lại tại thời điểm 90,8 giây. Khu vực bị ảnh hưởng bởi trượt lở và vùng lắng đọng trầm tích được thể hiện trong hình 5d.



Hình 5. Kết quả mô phỏng khối trượt lớn tại hồ Vạn Hội.

3.3. Đánh giá nguy cơ sóng thần gây ra do trượt lở sử dụng mô hình LS-TSUNAMI

Đánh giá nguy cơ xuất hiện sóng thần do sự hình thành khối trượt tiềm năng được thực hiện trong mô phỏng máy tính LS-TSUNAMI. Trong mô hình sóng thần, các thông số của khối trượt có được từ mô hình LS-RAPID được sử dụng làm dữ liệu đầu vào trong mô hình sóng thần. Hệ số nhám thủy lực Manning's biểu thị độ nhám giữa nước và bề mặt đất $R = 0,025 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ được lựa chọn theo giá trị kinh nghiệm qua nhiều nghiên cứu (Sassa và nnk., 2016). Đập thủy lợi Vạn Hội có chiều rộng 5 m, chiều cao 25 m, chiều dài 562 m với cao trình đỉnh đập + 47 m và cao trình đỉnh tường chắn sóng + 48 m. Mực nước vận hành thường xuyên của hồ được duy trì ở cao trình + 44,0 m (MARD, 2005), đây là mực nước được xem xét đánh giá kịch bản hình thành sóng thần. Kết quả mô hình trong khoảng thời gian 600 giây được thể hiện trong hình 6.



Hình 6. Kết quả mô phỏng sóng thần do hình thành khối trượt tiềm năng tại hồ Vạn Hội.

Khối trượt sau khi hình thành trên sườn dốc bắt đầu dịch chuyển với vận tốc lớn vào trong lòng hồ và phát sinh sóng thần trên mặt hồ. Sóng lan truyền trên mặt hồ tiếp tục di chuyển ra xung quanh, xô đập vào bờ hồ phía đối diện và bờ kè thượng lưu đập, sau đó sóng nước tràn qua đỉnh đập. Chiều cao đỉnh sóng lớn nhất hình thành trên mặt hồ là 7,6 m, trong khi chiều cao sóng thần tác động ở khu vực dọc theo đập từ 5,0 đến 5,4 m. Theo kết quả mô phỏng, một khu vực rộng ngay phía dưới hạ lưu đập sẽ bị ảnh hưởng. Mặc dù vậy, khu vực tràn xả lũ và dốc nước không bị tác động nhiều như sự cố năm 2016. Nguyên nhân là bởi vì so với khối trượt gây sóng thần năm 2016 thì khối trượt tiềm năng có cao độ đỉnh thấp hơn, quy mô nhỏ hơn và hướng trượt không vuông góc với thân đập.

4. Thảo luận và kết luận

Trong bài báo này, kết quả đánh giá nguy cơ xuất hiện khối trượt tiềm năng và kịch bản hình thành sóng thần tại hồ Vạn Hội được đề cập. Thử nghiệm cắt vòng mô phỏng trượt lở xảy ra do mưa được thực hiện trên mẫu đất là vật liệu phong hóa hoàn toàn của đá gneis trong khu vực nghiên cứu. Mẫu đất bị phá hủy và hình thành dịch chuyển với áp lực nước lỗ rỗng đạt giá trị 150 kPa, tương ứng với hệ số áp lực nước lỗ rỗng đạt giá trị $r_u = 0,65$. Các thông số thử nghiệm cắt vòng và hệ số áp lực nước lỗ rỗng được sử dụng trong mô hình LS-RAPID mô phỏng sự hình thành và dịch chuyển của khối trượt tiềm năng. Trong mô hình máy tính được kiểm chứng thì sườn dốc bắt đầu dịch chuyển khi hệ số áp lực nước lỗ rỗng đạt tới giá trị tới hạn $r_{uc} = 0,63$. Giá trị này lớn hơn nhiều so với giá trị áp lực nước lỗ rỗng tới hạn kích hoạt khối trượt quy mô lớn gây sóng thần năm 2016 ($r_{uc} = 0,55$, Tien và nnk., 2023). Trong sự kiện năm 2016, mưa lớn làm gia tăng mực nước ngầm trong sườn dốc nhưng chưa đạt đến giá trị tới hạn có thể gây ra sự dịch chuyển của sườn dốc này. Một nguyên nhân khác có thể đó là do khối trượt tiềm năng nằm trên sườn dốc thoải hơn và có các điều kiện địa tầng, địa chất và cấu trúc mặt trượt ít bất lợi hơn so với khu vực xảy ra trượt lở năm 2016.

Kết quả mô phỏng máy tính tích hợp sử dụng mô hình LS-RAPID và LS-TSUNAMI cho thấy khối trượt tiềm năng dịch chuyển nhanh vào trong lòng hồ với vận tốc khoảng 21 m/s gây sóng thần trong hồ với chiều cao sóng lớn nhất là 7,6 m. Sóng nước hình thành lan rộng trên mặt hồ, va xô vào phía bờ đối diện và thân đập, sau đó tràn qua đỉnh đập với chiều cao từ 5,0 đến 5,4 m gây ảnh hưởng tới khu vực thân đập phía hạ lưu. Dựa vào kết quả mô phỏng kịch bản trượt lở gây sóng thần này, các biện pháp ứng phó và giảm thiểu rủi ro thiệt hại có thể được đề xuất phục vụ an toàn trong vận hành công trình hồ và đập chứa nước Vạn Hội. Gần đây, trượt lở đang trở thành mối đe dọa đến sự vận hành an toàn công trình đập, hạ tầng và khu vực dân cư ở vùng hạ

lưu. Nghiên cứu sử dụng mô hình tích hợp LS-RAPID và LS-TSUNAMI mô phỏng trượt lở và sóng thần do trượt lở có ý nghĩa thực tiễn và có thể được áp dụng cho các khu vực hồ đập có nguy cơ trượt lở cao tại Việt Nam.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 105.08-2019.14. Nhóm tác giả cũng xin gửi lời cảm ơn chân thành tới TS. Ngô Quốc Kim Long (*DJA Enterprise Việt Nam*) và ThS. Đỗ Cảnh Hào (*Viện Đào tạo và Khoa học ứng dụng miền Trung, Đại học Thủy lợi*) đã có nhiều hỗ trợ cho đề tài.

Tài liệu tham khảo

- Duc, D.M., Khang, D., Duc, D.M., Ngoc, D.M., Quynh, D.Q., Thuy, D.T., Giang, N.K.H., Tien, P.V., Ha, N.H., 2020. Analysis and modeling of a landslide-induced tsunami-like wave across the Truong river in Quang Nam province, Vietnam. *Landslides* 17, 2329-2341.
- Iqbal, J., Tu, X., Xu, L., 2017. Landslide Hazards in Reservoir Areas: Case Study of Xiangjiaba Reservoir, Southwest China. *Nat. Hazards Rev.*, 2017, 18(4): 04017009
- Korup, O., 2005. Geomorphic hazard assessment of landslide dams in South Westland, New Zealand: Fundamental problems and approaches. *Geomorphology* 66 (2005) 167-188.
- Kranzer, H.C., Keller, J.B., 1960. Water waves produced by explosions, *Journal of Applied Physics*, pp. 398-407.
- Luong, L.H., Miyagi, T., Tien, P.V., Loi, D.H., Hamasaki, E., Abe, S., 2017. Landslide risk evaluation in central provinces of Vietnam. *Advancing Culture of Living with Landslides*, 1145-1153.
- MARD, 2005. Quy trình vận hành điều tiết hồ chứa nước Vạn Hội tỉnh Bình Định. Bộ Nông nghiệp và phát triển nông thôn (MARD), 18 trang.
- Nguyễn Văn Phú, 2019. Báo cáo về việc Sạt lở núi trong lòng hồ gây ra sự cố công trình hồ chứa nước Vạn hội, huyện Hoài Ân. *Công ty TNHH KTCT Thủy lợi*, tỉnh Bình Định.
- Panizzo, A., Girolamo, De., Risio, P., Di, M., Maistri, A., Petaccia, A., 2005. Great landslide events in Italian artificial reservoirs. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 733-740.
- Sassa, K., Khang, D., Yanagisawa, H., He, B., 2016. A new landslide-induced tsunami simulation model and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama landslide-and-tsunami disaster. *Landslides*, 13, 1405-1419.
- Sassa, K., Nagai, O., Solidum, R., Yamazaki, Y., Ohta, H., 2010. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide. *Landslides*, 7(3), 219-236.
- Tien, P.V., Luong, L.H., Nhan, T.T., Duc, D.M., Phi, N.Q., Lan, N.C., Quynh, D.T., Hieu, T.T., Anh, N.D., Nguyen, T.N.H., Huong, N.T.M., 2022. Simulating a rainfall-induced deep-seated landslide in Van Hoi reservoir, Binh Dinh province. *Proceedings of the National Conference for Earth Sciences and Natural Resources for Sustainable Development*, 539-544.
- Tien, P.V., Luong, L.H., Nhan, T.T., Phi, N.Q., Trinh, P.T., Quynh, D.T., Duc, D.M., Lan, N.C., Cuong, N.H., 2023. Mechanism and numerical simulation of a rapid deep-seated landslide in Van Hoi reservoir, Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 45(3), 357-373.
- Tien, P.V., Luong, L.H., Duc, D.M., Trinh, P.T., Quynh, D.T., Lan, N.C., Thuy, D.T., Phi, N.Q., Cuong, T.Q., Khang, D., Loi, D.H., 2021a. Rainfall-Induced Catastrophic Landslide in Quang Tri Province: the Deadliest Single Landslide Event in Vietnam in 2020. *Landslides*, 18(6), 2323-2327.
- Tien, P.V., Luong, L.H., Nhan, T.T., Duc, D.M., Quynh, D.T., Lan, N.C., Phi, N.Q., Hao, D.C., Ha, N.H., Thuy, D.T., 2021b. Secondary Processes Associated with Landslides in Vietnam, *Lecture Notes of Civil Engineering*, 108, 192-209.
- Tien, P.V., Sassa, K., Takara, K., Tam, D.M., Quang, L.H., Khang, D., Luong, L.H., Loi, D.H., 2016. The influence of rainfalls on the potential of landslide occurrence on Hai Van Mountain in Vietnam. *Proceeding of the Final SATREPS Workshop on Landslides*, 112-121.

- Tien, P.V., Trinh, P.T., Luong, L.H., Nhat, L.M., Duc, D.M., Hieu, T.T., Cuong, T.Q., Nhan, T.T., 2021c. The October 13, 2020 deadly rapid landslide triggered by heavy rainfall in Phong Dien, Thua Thien Hue, Vietnam. *Landslides*, 18(6), 2329-2333.
- Wang, F., Zhang, Y., Huo, Z., Peng, X.M., 2008. Mechanism for the rapid motion of the Qianjiangping landslide during reactivation by the first impoundment of the Three Gorges Dam reservoir, China. *Landslides*, 5 (4): 379-386.

Hazard assessment of potential landslide-induced tsunami waves in Van Hoi reservoir, Binh Dinh province

Pham Van Tien^{1,2,*}, Le Hong Luong³, Tran Thanh Nhan⁴, Tran Trung Hieu², Dinh Thi Quynh¹, Nguyen Khac Hoang Giang⁵, Dao Minh Duc², Nguyen Thanh Duong⁶, Do Minh Ngoc¹, Pham Huy Dung⁷

¹ Institute of Geotechnolgy and Environment, Hanoi, Vietnam; ² Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology; ³ Institute of Transport Science and Technology;

⁴ University of Sciences, Hue University; ⁵ Hanoi University of Natural Resources and Environment;

⁶ Hanoi University of Mining and Geology; ⁷ Thuyloi University

*Corresponding author: phamtiengvt@gmail.com

Abstract

Reservoir landslides threaten infrastructure and human lives, but their formation can also cause other secondary hazards, such as tsunamis, overtopping, dam breaches, and downstream floods. The 2016 rainfall-induced landslide and its tsunami in the Van Hoi reservoir brings a new problem that needs to be studied in Vietnam. A potential landslide will likely occur on the slope opposite the dam facilities in the Van Hoi reservoir area. Therefore, this paper aims at hazard assessment of landslide-induced tsunamis by using an integrated simulation model with LS-RAPID and LS-TSUNAMI software. The research results show that the potential landslide can be triggered by heavy rain with a pore water pressure ratio of $r_{uc}=0,63$. In the computer model, the sliding block rapidly moves at about 21 m/s, causing a tsunami wave in the lake with a height of 7,6 m. Waves with a 5,0 to 5,4 m height overflowed the dam's crest and impacted the Van Hoi downstream area. This study is beneficial for predicting the occurrence of rainfall-induced landslides and proposing solutions to cope with tsunami scenarios triggered by downslope movement in the Van Hoi reservoir.

Keywords: landslides, tsunami, LS-RAPID and LS-TSUNAMI, pore water pressure, Van Hoi reservoir.