

NGHIÊN CỨU NGUYÊN NHÂN VÀ DIỄN BIẾN XÓI LỎ MÁI HẠ LƯU ĐẬP ĐẤT HỒ SÔNG SẮT, TỈNH NINH THUẬN

Trần Văn Vững

Viện Đào tạo và Khoa học ứng dụng Miền Trung, Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: An toàn đập đất đang trở thành vấn đề toàn cầu cấp thiết trong bối cảnh biến đổi khí hậu với tần suất ngày càng tăng của các hiện tượng thời tiết cực đoan. Tại Nam Trung Bộ, đặc điểm khí hậu khô hạn kéo dài xen kẽ với các trận mưa lớn, cùng với tính chất tan rã mạnh của đất đắp, là nguyên nhân chính gây mất ổn định mái đập. Nghiên cứu này tập trung phân tích quá trình xói lở tại mái hạ lưu đập hồ Sông Sắt (Ninh Thuận), dựa trên chuỗi quan trắc thực địa từ năm 2014 đến 2025 – cách tiếp cận còn hiếm gặp trong nghiên cứu trong và ngoài nước. Kết quả cho thấy số lượng và kích thước hố sụt tăng mạnh theo thời gian, có quy luật tương ứng với biến động thời tiết. Các thí nghiệm Pinhole, Crumb và ESP xác nhận đất đắp có hàm lượng hạt mịn cao, dễ mất kết cấu, tan rã khi gặp nước, đặc biệt sau các kỳ khô hạn. Nghiên cứu này đánh giá nguyên nhân và diễn biến xói lở, từ các phân tích, nghiên cứu đề xuất nhóm giải pháp kỹ thuật nhằm tăng cường an toàn công trình trong điều kiện khí hậu ngày càng khắc nghiệt.

Từ khóa: Xói lở đập đất; Hồ chứa nước Sông Sắt; Đất tan rã; Xói ngầm; Biến đổi khí hậu.

Summary: The safety of earthen dams is becoming an urgent global concern in the context of climate change, which is marked by increasing frequency and intensity of extreme weather events. In the South Central Coast of Vietnam, prolonged droughts alternating with intense rainfall events, combined with the high dispersibility of embankment soils, are the primary causes of downstream slope instability. This study focuses on analyzing the erosion process on the downstream slope of the Song Sat reservoir dam (Ninh Thuan Province), based on a long-term field monitoring dataset from 2014 to 2025 - an approach rarely applied in both national and international research. Results show a significant increase in both the number and size of sinkholes over time, following identifiable patterns corresponding to weather fluctuations. Laboratory tests including the Pinhole, Crumb, and ESP confirm that the embankment soil contains a high proportion of fine particles, is structurally weak, and highly prone to dispersion and collapse upon water exposure, especially after dry seasons. The study clarifies the causes and evolution of erosion and proposes a set of engineering solutions aimed at enhancing dam safety under increasingly severe climatic conditions.

Keywords: Earthen dam erosion; Sông Sắt Reservoir; Dispersive soils; Internal erosion; Climate change.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xói lở và tan rã đất trong đập đất là vấn đề nghiêm trọng trên toàn cầu, đặc biệt trong bối cảnh khí hậu ngày càng cực đoan. Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chỉ ra rằng đất dễ tã rã là nguyên nhân chính gây mất ổn định mái đập, đặc biệt trong điều kiện khô hạn kéo dài kết hợp với mưa lớn đột ngột. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu trước đây tập trung vào vùng khí hậu ôn hòa, chưa phản ánh rõ đặc thù khắc nghiệt như ở Nam Trung Bộ, Việt Nam. Khu vực này thường xuyên đối mặt với mùa

khô kéo dài khiến đất nứt nẻ, tiếp sau là mưa lớn gây thấm sâu, xói ngầm và hình thành hố sụt. Hồ Sông Sắt (Ninh Thuận) là một ví dụ điển hình, đã ghi nhận hàng trăm hố sụt kể từ năm 2014. Trong bối cảnh đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm: (i) Đánh giá đặc tính tan rã và khả năng chống xói của đất đắp đập; (ii) Phân tích cơ chế xói lở qua các thí nghiệm Pinhole, Crumb và ESP; (iii) Đề xuất giải pháp kỹ thuật phù hợp cho điều kiện khí hậu khắc nghiệt tại Nam Trung Bộ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu nhằm xác định cơ chế xói lở và đặc tính tan rã của đất đắp tại mái hạ lưu đập đất hồ Sông Sắt trong điều kiện khí hậu khắc nghiệt vùng Nam Trung Bộ. Dữ liệu được thu

Ngày nhận bài: 28/3/2025

Ngày thông qua phản biện: 20/5/2025

Ngày duyệt đăng: 02/6/2025

thập qua khảo sát thực địa định kỳ kết hợp đo đạc địa hình bằng GPS và toàn đạc điện tử, nhằm theo dõi diễn biến rãnh xói và hồ sụt theo thời gian. Mẫu đất lấy từ các vị trí có dấu hiệu sụt lún, phân tích theo lớp sâu, được dùng cho ba thí nghiệm chính: (i) Pinhole Test đánh giá khả năng xói ngầm và phá vỡ kết cấu nội bộ; (ii) Crumb Test xác định mức độ tan rã khi tiếp xúc nước; và (iii) ESP đánh giá tỷ lệ natri trao đổi phản ánh độ ổn định hóa học. Thiết bị và quy trình được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM. Kết quả thí nghiệm được đối chiếu với dữ liệu quan trắc hiện trường để xác lập mối liên hệ giữa điều kiện thời tiết và tính chất vật lý – hóa học của đất, từ đó đánh giá nguy cơ xói lở và đề xuất giải pháp phù hợp.

3. KẾT QUẢ QUAN TRẮC VÀ THÍ NGHIỆM

3.1. Diễn biến xói lở theo thời gian

Giai đoạn từ năm 2014–2017: Trong giai đoạn này, xói lở bắt đầu xuất hiện rõ rệt, đặc biệt sau mùa mưa lớn năm 2016. Đất mặt mái đập bị nứt nẻ do khô hạn kéo dài, làm giảm độ bền và tăng khả năng thấm nước. Mưa lớn đột ngột khiến nước thấm nhanh vào các khe nứt, tạo áp lực lỗ rỗng cao, gây tan rã đất và xói mòn cục bộ, nhất là tại khu trung tâm và hạ lưu mái đập. Nhiều vết nứt, rãnh nhỏ và hồ sụt (0,2–0,5 m) xuất hiện dọc theo rãnh thoát nước tự nhiên. Tuy quy mô nhỏ, nhưng đây là dấu hiệu cảnh báo xói lở nghiêm trọng hơn sau này. Hiện tượng này tương tự với các nghiên cứu tại Australia, nơi đất sét nứt khô dễ bị rửa trôi khi gặp mưa lớn (Blight, 1997).



Hình 1: Hình ảnh các hồ sụt tại mái hạ lưu đập năm 2014-2017

Giai đoạn từ năm 2018–2020: Từ cuối năm 2018, xói lở tại mái hạ lưu đập diễn biến nghiêm trọng hơn cả về phạm vi lẫn quy mô. Nguyên nhân chủ yếu là mưa lớn đột ngột sau khô hạn dài ngày, cộng với hệ thống thoát nước yếu và địa chất không đồng nhất. Dòng chảy mặt tập trung và xói ngầm đã làm suy yếu cấu trúc đất, gây ra các rãnh xói sâu và hồ sụt lớn (0,5–1,0 m), tập trung tại khu giữa và hạ lưu mái đập. Quan trắc cho thấy các hồ sụt

liên kết thành mạng xói liên hoàn, làm giảm hiệu quả lớp bảo vệ mái. Dự án WB8 được triển khai với kinh phí trên 10 tỷ đồng nhằm gia cố mái bằng vải địa kỹ thuật, lưới bảo vệ và cải tạo thoát nước, nhưng vẫn chỉ là giải pháp tạm thời, chưa xử lý tận gốc nên đất tan rã. Hiện tượng tương tự được ghi nhận tại Trung Quốc, nơi mưa lớn sau hạn gây rồng hóa và sụt lún đập đất (Wang & Zhang, 2017).



Hình 2: Hình ảnh các hồ sụt tại mái hạ lưu đập năm 2018-2020

Giai đoạn từ năm 2020-2023: Tình trạng xói lở chuyển sang mức báo động, đặc biệt sau các trận bão lớn với lượng mưa kéo dài vượt khả năng tiêu thoát. Đất đã suy yếu sau nhiều năm tan rã, kết hợp với hệ thống thoát nước kém, dẫn đến thấm sâu và xói ngầm nghiêm trọng. Xuất hiện hàng loạt hố sụt lớn (0,5–3,5 m đường kính, sâu tới 2,5 m), phân bố khắp mái hạ lưu, nhiều hố liên kết thành hệ thống rộng

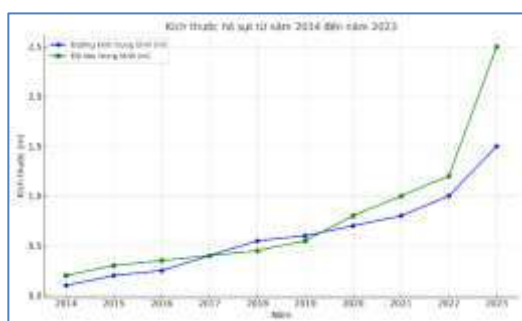
ngầm, làm suy giảm cấu trúc đập và gây trượt lở quy mô lớn. Đến tháng 11/2023, tổng cộng 626 hố sụt được ghi nhận, trong đó 67 hố có đường kính >1 m. Dù đã tiến hành gia cố tạm với kinh phí gần 1 tỷ đồng, hiệu quả chưa ổn định, nhất là tại các khu vực chưa được xử lý triệt để. Hiện tượng tương tự từng được ghi nhận tại Tây Ban Nha và Ý, nơi lũ sau hạn gây sụt lún do xói ngầm (Griffiths & Lane, 1999).



Hình 3: Hình ảnh các hố sụt tại mái hạ lưu đập năm 2020-2023

Bảng 1: Diễn biến hồ xói giai đoạn từ năm 2014 đến năm 2023

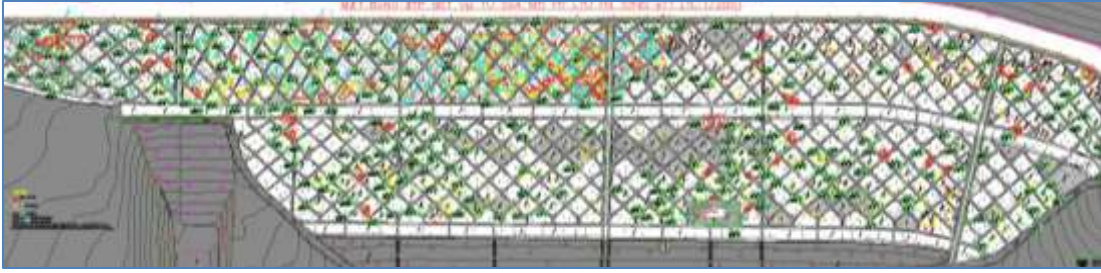
Năm	Số lượng hố xói (hố)	Đường kính trung bình (m)	Độ sâu trung bình (m)
2014	20	0,1	0,2
2015	25	0,2	0,3
2016	30	0,25	0,35
2017	45	0,4	0,4
2018	50	0,55	0,45
2019	70	0,6	0,55
2020	150	0,7	0,8
2021	200	0,8	1,0
2022	250	1,0	1,2
2023	626	1,5	2,5



Hình 4: Biểu đồ kích thước hố sụt theo thời gian giai đoạn 2014-2023



Hình 5: Biểu đồ diễn biến hố sụt giai đoạn 2014-2023



Hình 6: Vị trí 626 hố sụt xuất hiện tại mái hạ lưu đập năm 2023

Giai đoạn từ tháng 12/2024 đến nay: Sau khi áp dụng các biện pháp gia cố tạm thời, mức độ xói lở có xu hướng giảm tại các khu vực đã xử lý. Tuy nhiên, hiện tượng hố sụt vẫn tiếp diễn tại các vùng chưa được gia cố hoặc tại ranh giới giữa các vùng xử lý. Quan trắc đến đầu

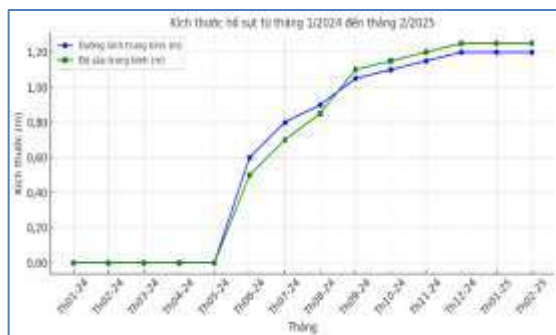
năm 2025 ghi nhận 390 hố sụt đang tồn tại và phát triển, nhiều hố có đường kính 0,5–1,0 m và sâu tới 1,5 m. Điều này cho thấy các biện pháp hiện tại chỉ có hiệu quả ngắn hạn, chưa đủ sức kiểm soát triệt để nếu không triển khai các giải pháp đồng bộ và bền vững hơn.



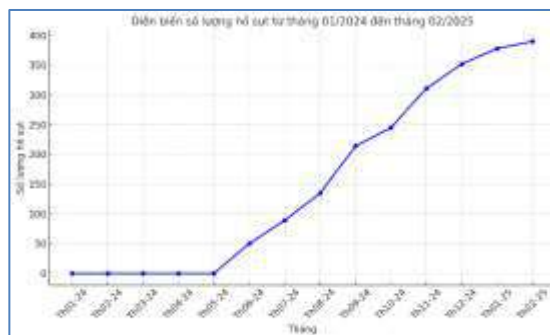
Hình 7: Hình ảnh các hố sụt tại mái hạ lưu đập năm 2025

Bảng 2: Diễn biến hồ xói giai đoạn từ năm 2024 đến năm 2025

Tháng	Số lượng hố xói (hố)	Đường kính trung bình (m)	Độ sâu trung bình (m)
1-2024	0	0	0
2-2024	0	0	0
3-2024	0	0	0
4-2024	0	0	0
5-2024	0	0	0
6-2024	50	0,6	0,5
7-2024	89	0,8	0,7
8-2024	135	0,9	0,85
9-2024	214	1,05	1,1
10-2024	245	1,1	1,15
11-2024	311	1,15	1,2
12-2024	352	1,2	1,25
1-2025	378	1,2	1,25
2-2025	390	1,2	1,25



Hình 8: Biểu đồ kích thước hố sụt theo thời gian giai đoạn 2024-:-2025



Hình 9: Biểu đồ diễn biến hố sụt giai đoạn 2024-:-2025



Hình 10: Vị trí 390 hố sụt tiếp tục xuất hiện tại mái hạ lưu đập năm 2025

Quá trình xói lở tại đập đất hồ Sông Sắt từ năm 2014 đến nay đã diễn biến phức tạp cả về số lượng và gia tăng về mức độ nghiêm trọng. Những dữ liệu quan trắc từ giai đoạn này khẳng định sự cần thiết của các giải pháp xử lý mang tính hệ thống và bền vững nhằm bảo đảm an toàn lâu dài cho công trình.

3.2. Kết quả thí nghiệm trong phòng xác định mức độ ta rã của đất

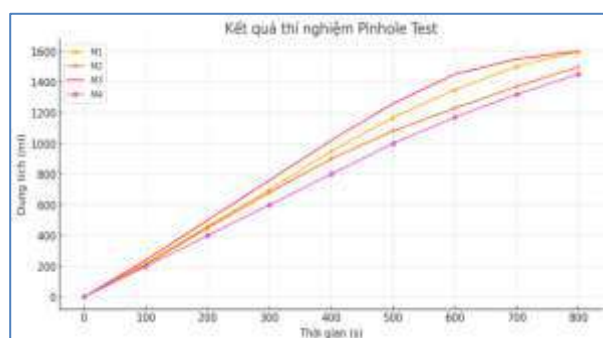
3.2.1. Thí nghiệm Pinhole Test

Để đánh giá đặc tính tan rã của đất đắp mái đập Sông Sắt, nhóm tác giả đã thực hiện thí nghiệm Pinhole theo ASTM D4647–93 trên 4 mẫu đất. Phân loại dựa trên độ đục của nước, lưu lượng nước qua lỗ kim và độ mở lỗ. Do mẫu bị vỡ sau khi bão hòa nên không xác định được độ mở lỗ kim. Kết quả từ độ đục và lưu lượng cho thấy cả 4 mẫu đều thuộc loại đất tan rã, phản ánh nguy cơ cao gây xói ngầm và mất ổn định mái đập.

Bảng 3: Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm Pinhole Test

		M1	M2	M3	M4
TT	V	t	t	t	t
1	0	0	0	0	0
2	100	31	29	26	36
3	200	75	69	63	87
4	300	118	107	96	140
5	400	157	143	128	185
6	500	201	184	166	235
7	600	237	216	194	280
8	700	281	256	231	331
9	800	327	296	265	389
10	900	370	336	301	439

		M1	M2	M3	M4
TT	V	t	t	t	t
11	1000	420	378	336	503
12	1100	461	415	369	553
13	1200	506	452	397	615
14	1300	552	492	432	671
15	1400	595	532	469	721
16	1500	639	571	502	775
Ảnh					
NTU		265	321	398	315
Kết luận		Tan rã	Tan rã	Tan rã	Tan rã



Hình 11: Diễn biến dung tích nước qua lỗ kim theo thời gian thí nghiệm

3.2.2. Thí nghiệm Crumb test

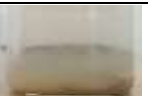
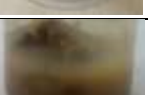
Để tăng độ tin cậy của nghiên cứu, nhóm tác giả đã thực hiện thêm thí nghiệm Crumb Test theo ASTM D6572-00 nhằm đánh giá đặc tính tan rã của đất đắp đập Sông Sắt. Thí nghiệm được tiến hành bằng cách thả mẫu đất vào cốc nước sạch và quan sát độ đục, hình thái nước đục và hình dạng mẫu để phân loại mức độ tan rã (tan rã, tan rã nhẹ, không tan rã). Kết quả cho thấy tất cả mẫu đất đều thuộc nhóm từ tan rã nhẹ đến tan rã mạnh, phù hợp với kết quả từ Pinhole Test.

Bảng 4: Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm Crumb Test

Tên mẫu	5'	1h	6h	24h	Kết luận
M1					Tan rã nhẹ
					
M2					Tan rã nhẹ
					

Tên mẫu	5'	1h	6h	24h	Kết luận
M3					Tan rã nhẹ
					

Bảng 4: Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm Crumb Test (tiếp theo)

Tên mẫu	5'	1h	6h	24h	Kết luận
M4					Tan rã
					
M5					Tan rã nhẹ
					
M6					Tan rã
					
M7					Tan rã
					
M8					Tan rã
					

Tên mẫu	5'	1h	6h	24h	Kết luận
M9					Tan rã
					

3.2.3. Thí nghiệm thành phần hóa học Chemical Test

Trong những năm 1960, các nhà nghiên cứu đã nhận ra sự hiện diện của Na^+ có thể trao đổi là yếu tố hóa học góp phần vào tính chất tan rã của đất sét. Thí nghiệm hóa học (Chemical Test) được xem là phương pháp thí nghiệm có độ chính xác cao được áp dụng rộng rãi trong các nghiên cứu và thực tiễn để xác định đặc tính tan

rã của đất. Phương pháp hóa học phổ biến nhất là thí nghiệm ESP (Exchangeable Sodium Percentage), theo đó, nếu $\text{ESP} > 10\%$: Đất thuộc dạng tan rã; $7\% < \text{ESP} < 10\%$: Đất thuộc loại tan rã vừa; và $\text{ESP} < 7\%$: Đất không tan rã. Từ phân tích đó, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích thành phần hóa học của 2 mẫu đất đắp đập Sông Sắt. Kết quả thí nghiệm cho thấy, cả 2 mẫu đều có chỉ số ESP lớn, đất thuộc loại đất tan rã.

Bảng 5: Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm hóa học và phân loại mức độ tan rã

Tên mẫu	pH	CEC (cmolc/ 100 g đất)	Ca (mg/100 g đất)	Mg (mg/100 g đất)	Na (mg/100 g đất)	K (mg/100 g đất)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SAR	ESP	Độ muối %	Mức độ tan rã
M1	6,08	21	2,2	0,8	3,4	4,3	514	27,76	16,19	0,029	Tan rã
M2	5,72	9	2,2	3,3	2,8		162,2	16,88	31,11	0,009	Tan rã

3.2.4. Đánh giá và phân tích kết quả thí nghiệm

Các kết quả thí nghiệm cho thấy đất đắp tại đập Sông Sắt có mức độ tan rã rất cao, đặc biệt với các mẫu chứa nhiều hạt mịn như sét. Áp lực nước thấm cao là nguyên nhân chính gây rửa trôi mạnh, làm giảm khả năng chống xói lở. Đất có độ chặt thấp dễ bị phá vỡ cấu trúc khi tiếp xúc với dòng chảy. Do đó, cần áp dụng biện pháp gia cố bằng vật liệu ổn định như vôi hoặc polymer để tăng độ liên kết và hạn chế tan rã. Đồng thời, hệ thống tiêu thoát nước cần được thiết kế hợp lý để giảm áp lực thấm, kết hợp tăng cường giám sát định kỳ nhằm phát hiện và xử lý kịp thời các dấu hiệu xói lở.

4. THẢO LUẬN

4.1. Cơ chế hình thành xói lở do đất tan rã

Cơ chế xói lở tại mái hạ lưu đập Sông Sắt là

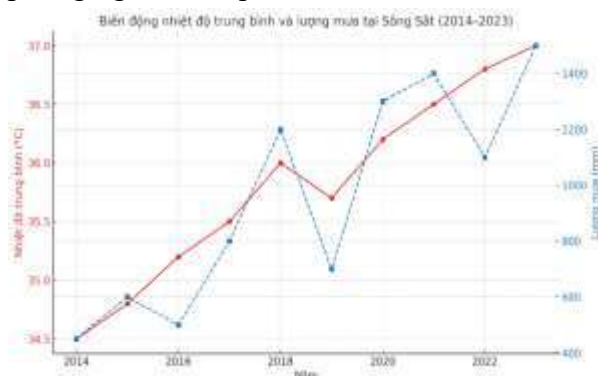
kết quả của sự cộng hưởng giữa đặc tính vật lý – hóa học của đất đắp và điều kiện khí hậu cực đoan vùng Nam Trung Bộ. Trong mùa khô kéo dài, đất mất nước, co ngót và nứt nẻ sâu, làm giảm liên kết nội bộ. Khi mưa lớn xuất hiện đột ngột, nước thấm nhanh qua các khe nứt, tạo áp lực lỗ rỗng cục bộ, phá vỡ cấu trúc đất – đặc biệt tại các lớp chứa nhiều hạt mịn. Với tính tan rã cao, đất dễ bị phân tán khi tiếp xúc với nước, dẫn đến xói mòn bề mặt và xói ngầm. Các thí nghiệm Pinhole và Crumb Test xác nhận đặc tính phân tán mạnh, trong khi chỉ số ESP cao ($>10\%$) phản ánh sự bất ổn hóa học do natri trao đổi lớn. Quá trình xói mòn diễn ra theo chiều sâu, hình thành hố sụt và đường rỗng ngầm, làm suy yếu khả năng chịu lực của mái đập. Cơ chế này cho thấy xói lở không chỉ là hiện tượng cơ học mà là hệ quả

tổng hợp của khí hậu khắc nghiệt, cấu trúc đất yếu và thành phần hóa học bất lợi – điều này cần được xem xét kỹ lưỡng trong thiết kế và vận hành đập đất dưới tác động của biến đổi khí hậu.

4.2. Môi liên hệ giữa khí hậu và sự suy giảm kết cấu đất

Kết quả nghiên cứu cho thấy chu kỳ khí hậu bất thường – khô hạn kéo dài xen kẽ với mưa lớn đột ngột – là nguyên nhân chính làm suy giảm nhanh kết cấu đất đắp tại mái hạ lưu đập Sông Sắt. Tại Nam Trung Bộ, mùa khô kéo dài 6–8 tháng với nhiệt độ $>35^{\circ}\text{C}$ và độ ẩm $<60\%$ khiến đất sét pha cát co ngót, nứt nẻ sâu. Khi mưa lớn đầu mùa (200–300 mm/3 ngày) xảy ra, nước thấm nhanh qua các khe nứt, tạo chênh lệch độ ẩm và phá vỡ cấu trúc đất, dẫn đến xói mòn và hình thành hồ sụt.

Hiện tượng này phù hợp với các nghiên cứu quốc tế như Blight (1997) và Foster et al. (2000), tuy nhiên đập Sông Sắt có điểm đặc biệt là đất đắp có hàm lượng hạt mịn $>40\%$ và chỉ số ESP rất cao (15–30%), làm tăng mạnh tính tan rã. So với nghiên cứu (Wang & Zhang, 2017), quá trình xói lở tại đây diễn ra nhanh hơn và nghiêm trọng hơn, nhất là khi hệ thống thoát nước chưa hoàn chỉnh. Điều này cho thấy các đập đất sử dụng vật liệu dễ tan rã trong điều kiện khí hậu khắc nghiệt có nguy cơ mất ổn định rất cao nếu không có giải pháp phòng ngừa hiệu quả.



Hình 12: Biểu đồ biến động nhiệt độ trung bình và lượng mưa tại Sông Sắt (2014–2023)

4.3. Đánh giá hiệu quả các biện pháp gia cố hiện có

Trong những năm gần đây, để hạn chế xói lở mái hạ lưu, hồ chứa nước Sông Sắt đã áp dụng một số biện pháp gia cố tạm thời như đắp đất hoàn nguyên, lót lưới thép, sử dụng bao tải hoặc cọc tre, và nâng cấp hệ thống tiêu thoát nước. Tuy nhiên, kết quả quan trắc thực địa cho thấy hiệu quả của các biện pháp này còn hạn chế. Các hồ sụt vẫn tiếp tục tái xuất hiện sau mỗi mùa mưa, do lớp đất đắp lại không được xử lý bằng vật liệu ổn định và chống tan rã, trong khi xói ngầm và sự suy yếu bên trong thân đập chưa được can thiệp triệt để. Dự án WB8 triển khai từ năm 2019 với kinh phí hơn 10 tỷ đồng đã góp phần cải thiện hệ thống tiêu thoát và gia cố bằng vải địa kỹ thuật, nhưng vẫn mang tính thụ động. Hệ thống quan trắc chưa tự động hóa, còn phụ thuộc vào kiểm tra thủ công, khiến việc cảnh báo và ứng phó kém hiệu quả. Nhìn chung, các biện pháp hiện tại còn thiếu tính tổng thể và chưa giải quyết tận gốc nguyên nhân từ đất tan rã. Điều này cho thấy cần thiết phải nghiên cứu và áp dụng các giải pháp công nghệ bền vững hơn trong thời gian tới.

4.4. Khuyến nghị giải pháp kỹ thuật

Từ kết quả nghiên cứu và diễn biến xói lở tại mái hạ lưu đập Sông Sắt, tác giả đề xuất một số giải pháp kỹ thuật tổng thể nhằm nâng cao độ ổn định công trình trước tác động khí hậu khắc nghiệt:

- Cải tạo đất bằng phụ gia ổn định: Dựa trên nghiên cứu của Sherard et al. (1976), Little (1995), và kết quả thực nghiệm tại hiện trường, khuyến nghị phối trộn vôi hoặc polymer với tỷ lệ 3–5% khối lượng đất nhằm tăng liên kết hạt, giảm phân tán và nâng cao khả năng chống tan rã.
- Gia cố mái bằng cấu kiện bền vững: Theo Foster et al. (2000), cần áp dụng vải địa kỹ thuật, lưới thép hoặc phun bê tông tại các vùng dễ bị xói lở – đặc biệt tại rãnh xói hoặc khe nứt lặp lại – nhằm hạn chế dòng chảy mặt và thấm sâu.
- Nâng cấp hệ thống tiêu thoát nước: Wang & Zhang (2017) nhấn mạnh vai trò của tiêu nước trong kiểm soát xói ngầm. Do đó, đề xuất thiết kế lại rãnh tiêu mái, bổ sung ống tiêu sâu và giếng tiêu áp tại chân đập.

- Ứng dụng quan trắc tự động: Fell et al. (2007) đề xuất lắp đặt cảm biến độ ẩm, áp lực nước lỗ rỗng và UAV để phát hiện sớm biến động. Giải pháp này giúp cảnh báo sớm và hỗ trợ bảo trì chủ động.
- Tích hợp dự báo khí hậu: Theo IPCC (2021), cần tích hợp mô hình dự báo khí tượng thủy văn vào quy trình vận hành hồ, đặc biệt trong giai đoạn chuyển tiếp giữa khô hạn và mưa lớn để đảm bảo an toàn mái đập.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã làm sáng tỏ cơ chế xói lở mái hạ lưu đập đất hồ Sông Sắt trong điều kiện khí hậu khắc nghiệt đặc trưng của Nam Trung Bộ, nơi có mùa khô kéo dài xen kẽ với các trận mưa lớn ngắn ngày. Kết quả cho thấy hiện tượng xói lở diễn ra theo quy luật lặp lại: khô hạn → nứt đất → mưa lớn → thấm nhanh → tan rã và xói ngầm → hồ sụt → mất ổn định đập.

Thí nghiệm Crumb và Pinhole xác nhận đất có hàm lượng hạt mịn cao và dễ tan rã, với lưu

lượng nước qua lỗ kim vượt 0,5 mL/s ngay trong 30 giây đầu. Kết quả quan trắc từ 2014 đến 2025 ghi nhận hơn 1.000 hồ sụt, nhiều hồ sâu tới 2,5 m, cho thấy tình trạng xói lở nghiêm trọng và chưa được kiểm soát bền vững.

Khác với các nghiên cứu trước chỉ tập trung một chiều (xói mặt hoặc xói ngầm), nghiên cứu này đã tích hợp yếu tố khí hậu, đặc tính đất và điều kiện thực địa để xây dựng mô hình cơ chế tổng thể. Các giải pháp đề xuất bao gồm: cải tạo đất bằng phụ gia chống tan rã, nâng cấp hệ thống tiêu nước, gia cố mái bằng vật liệu bền vững và áp dụng quan trắc tự động.

Tuy nhiên, nghiên cứu còn hạn chế do chỉ khảo sát một công trình và một số loại đất nhất định, chưa mô phỏng thủy lực toàn hồ. Cần mở rộng khảo sát tại nhiều đập và vùng khí hậu khác để xây dựng cơ sở dữ liệu toàn diện hơn phục vụ công tác thiết kế và quản lý an toàn đập đất trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Smith, J.A., & Brown, L.K. (2021). "Advancements in Embankment Dam Erosion Control Techniques." *Journal of Geotechnical Engineering*, 147(3), 04021005.
- [2] Miller, G.R., & Davis, K.W. (2024). "Numerical Modeling of Seepage-Induced Erosion in Earthen Dams." *Computers and Geotechnics*, 152, 104857.
- [3] Walker, S.J., & Hughes, L.B. (2023). "Risk Assessment of Internal Erosion in Embankment Dams." *Geotechnical Risk and Safety*, 14(1), 45-58.
- [4] Foster, J.P., & Adams, K.L. (2024). "The Role of Vegetation in Mitigating Surface Erosion on Embankment Dams." *Ecological Engineering*, 182, 106689.
- [5] Mitchell, D.S., & Parker, J.N. (2022). "Assessing the Impact of Soil Properties on Erosion Rates in Embankment Dams." *Soil Science Society of Australia Journal*, 58(4), 567-579.
- [6] Campbell, R.T., & Edwards, S.L. (2020). "Design Considerations for Erosion Control in Small Earth Dams." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100745.
- [7] Fujimoto, Y., & Nakamura, S. (2023). "Field Observations of Seepage-Induced Erosion in Embankment Dams." *Geotechnical Engineering Journal*, 70(2), 150-163.
- [8] Hirose, A., & Matsumoto, D. (2020). "Numerical Analysis of Internal Erosion Processes in Earth Dams." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(5), 04020021.
- [9] Nguyễn Văn Nam, Trần Văn Dũng (2018). "Nghiên cứu đặc điểm xói lở đập đất hồ chứa nước miền Trung Việt Nam." *Tạp chí Khoa học Thủy lợi*, 8(3), 45-53.
- [10] Phạm Văn Hùng, Lê Hữu Quang (2021). "Đánh giá ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến xói lở đập đất tại khu vực Nam Trung Bộ." *Tạp chí Khoa học Thủy lợi*, 21(5), 30-38.
- [11] Lê Hoàng Sơn (2020). "Đặc điểm địa chất và cơ chế xói lở tại đập đất vùng khô hạn Nam Trung Bộ." *Hội thảo Quốc gia về Đập và Hồ chứa nước, Hà Nội*.