ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ KINH TẾ-KỸ THUẬT VÀ TÁC ĐỘNG MÔI TRƯỜNG CỦA VẬT LIỆU ĐẮP NỀN ĐƯỜNG K95, K98 VÀ BÊ TÔNG XI MĂNG SỬ DỤNG TRO BAY

EVALUATION OF TECHNO-ECONOMIC EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF K95, K98 SUBGRADE MATERIALS AND HIGH FLY ASH CONCRETE

TS. Nguyễn Thanh Tâm - *Trường Kỹ thuật và Công Nghệ, Đại học Trà Vinh.*
Email: Tamxd@tvu.edu.vn; ĐT: 0982.284.405
ThS. Kỷ Minh Hưng* - *Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Trà Vinh.*
** Tác giả liên hệ Email: kmhung12@tvu.edu.vn; ĐT: 0947.014.050*

Tóm tắt: Hiện nay, sự khan hiếm nghiêm trọng vật liệu truyền thống như đất đồi và cát sông tại ĐBSCL đang là thách thức lớn. Giải pháp tận dụng phế phẩm từ các nhà máy nhiệt điện (tro bay, tro đáy) kết hợp với cát nhiễm mặn địa phương đang nổi lên như một hướng đi đột phá, không chỉ giải quyết bài toán thiếu hụt vật liệu mà còn xử lý khối lượng lớn chất thải công nghiệp. Bài báo trình bày kết quả đánh giá toàn diện hiệu quả kinh tế, kỹ thuật và môi trường của việc sử dụng hỗn hợp tro xỉ - cát mặn làm nền K95, K98 và ứng dụng tro bay hàm lượng cao trong bê tông mặt đường cứng. Kết quả chỉ ra rằng cấp phối TX7CM3 (70% tro xỉ, 30% cát mặn) đáp ứng xuất sắc giới hạn Atterberg, cường độ CBR và tiết kiệm 88% chi phí vật tư. Ngoài ra, việc thay thế 30% xi măng bằng tro bay giúp cải thiện động học thủy hóa, tăng cường độ lên 51.2 MPa ở tuổi 90 ngày và cắt giảm tới 55% lượng phát thải CO2 theo đánh giá vòng đời LCA.

Từ khóa: Tro bay, Cát nhiễm mặn, Nền đường K95, Bê tông, Đánh giá vòng đời (LCA).

Abstract: The severe shortage of traditional materials such as hill soil and river sand in the Mekong Delta poses a significant challenge to the progress of key projects. Utilizing industrial by-products (fly ash, bottom ash) combined with local saline sand emerges as a breakthrough solution, addressing both material shortages and industrial waste. This paper presents a comprehensive evaluation of the techno-economic efficiency and environmental impacts of using fly ash-saline sand mixtures for K95, K98 subgrades and high-volume fly ash concrete for rigid pavements. Experimental results indicate that the TX7CM3 mixture (70% ash, 30% saline sand) excels in Atterberg limits, CBR, and saves 88% in material costs. Substituting 30% of Portland cement with fly ash improves hydration kinetics, pushing compressive strength to 51.2 MPa at 90 days, while cutting CO2 emissions by 55% via LCA.

Keywords: Fly ash, Saline sand, K95 Subgrade, Concrete, LCA.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống thể chế pháp lý Việt Nam đang có những bước chuyển mình mạnh mẽ hướng tới mô hình kinh tế tuần hoàn theo định hướng của Nghị quyết 136/NQ-CP và Quyết định 1658/QĐ-TTg. Tại Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), hàng loạt dự án hạ tầng giao thông quy mô lớn đang được triển khai, đòi hỏi hàng chục triệu mét khối vật liệu đắp nền (K95, K98) mỗi năm. Việc phụ thuộc quá lớn vào việc khai thác cát sông và đất đồi đã và đang gây ra nhiều hệ lụy nghiêm trọng về sinh thái như sạt lở bờ sông, xói mòn ven biển. Trong khi đó, nguồn cung cát sông hợp pháp ngày càng khan hiếm, đẩy giá thành vật liệu lên mức kỷ lục.

Mặt khác, khu vực ĐBSCL đang phải đối mặt với lượng chất thải tro xỉ khổng lồ phát sinh từ các nhà máy nhiệt điện than (như nhiệt điện Duyên Hải). Hàng triệu tấn tro xỉ đang bị lưu trữ trên các bãi thải lộ thiên, gây áp lực lên không gian và tiềm ẩn rủi ro ô nhiễm. Cùng lúc đó, vùng ven biển lại có trữ lượng lớn cát nhiễm mặn. Tuy cát nhiễm mặn không phù hợp cho bê tông cốt thép thông thường do nguy cơ ăn mòn từ ion clorua, nó lại rất tiềm năng để dùng làm vật liệu đắp nền móng đường hoặc cấu kiện bê tông khối lớn.

Nghiên cứu này trình bày các kết quả thực nghiệm một cách có hệ thống nhằm đánh giá tiềm năng sử dụng hỗn hợp tro xỉ - cát mặn. Nghiên cứu đi sâu phân tích để làm rõ sự đồng thuận giữa tính bền vững cơ học, tính khả thi tài chính thông qua chi phí vòng đời (LCC) và những đóng góp phục hồi môi trường thông qua đánh giá vòng đời (LCA).

2. TỔNG QUAN TÀI LIỆU VÀ CƠ SỞ KHOA HỌC

2.1. Đặc tính vật liệu tro xỉ nhiệt điện

Tro xỉ nhiệt điện là sản phẩm phụ sinh ra sau quá trình đốt than, bao gồm tro bay (80-85%) và tro đáy (15-20%). Tro bay có hạt mịn (1-150 μm), giàu SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3. Tro bay loại F (ASTM C618) có hàm lượng CaO thấp nên tự thân ít có tính kết dính, nhưng lại có tính pozzolanic mạnh: phản ứng với $Ca(OH)_2$ sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng

để tạo thành gel Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) rắn chắc. Ngược lại, tro đáy thô hơn (0.1-50 mm), xốp và nhiều góc cạnh, đóng vai trò cung cấp khung xương cơ học tốt. Việc tận dụng trực tiếp hỗn hợp chưa phân tách giúp tối ưu hóa chi phí xử lý.

Đặc biệt, tro bay cung cấp một lượng hạt mịn rất lý tưởng để chèn khít vào các lỗ rỗng lớn trong các cấp phối tự nhiên, làm cho hỗn hợp sau khi đầm nén trở nên đặc chắc và có dung trọng cao hơn.

2.2. Đặc tính của cát nhiễm mặn và cơ sở phối trộn

Cát nhiễm mặn tại khu vực Ba Động (Trà Vinh) có phân bố hạt hẹp, lực dính kết biểu kiến c = 0, khiến khả năng chịu tải (CBR) nội tại rất thấp (<5%). Do đó, nó không thể dùng độc lập để đắp nền. Tuy nhiên, sự kết hợp giữa khung hạt thô (cát biển, tro đáy) và vật liệu chèn lấp (tro bay) giúp đường cong cấp phối trở nên liên tục và bám sát đường lý tưởng Fuller-Thompson.

Trong quá trình đầm nén cơ học, các hạt mịn tro bay chèn lấp lỗ rỗng vi mô, kết hợp với phản ứng pozzolanic nhẹ, làm tăng đáng kể lực dính và góc ma sát trong. Quá trình này giúp khóa chặt các hạt cát rời rạc, tạo ra một kết cấu có sức chịu tải vượt trội, hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu đắp nền đường đê bao hoặc nền đường cao tốc.

3. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Nguồn vật liệu và thành phần cấp phối

- Tro xỉ: Sử dụng hỗn hợp tro xỉ tổng hợp chưa qua phân tách được lấy tại bãi xỉ nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải. Riêng việc chế tạo bê tông mặt đường bắt buộc sử dụng tro bay tinh tuyển Class F, có độ mịn cao và hàm lượng carbon chưa cháy thấp (LOI < 6%), đạt chuẩn kỹ thuật ASTM C618 và TCVN 10302:2014.

- Cát nhiễm mặn: Cát được lấy tại mỏ Ba Động, Trà Vinh. Chỉ tiêu lý hóa tuân thủ TCVN 7570:2006. Dù hàm lượng ion Cl- cao hơn mức cho phép của bê tông cốt thép, nó vẫn an toàn cho lớp đắp nền đường hoặc kết cấu không sử dụng thép gia cường.

- Xi măng và Phụ gia: Xi măng PCB40 được kết hợp với phụ gia siêu dẻo hệ polycarboxylate nhằm kiểm soát tỷ lệ Nước/Chất kết dính (W/B) ở mức 0.32 - 0.35 cho các cấp phối bê tông cường độ cao.

3.2. Thiết kế cấp phối và tiêu chuẩn đánh giá

- Đối với vật liệu đắp nền (K95, K98): Thực hiện phối trộn Tro xỉ (TX) và Cát mặn (CM) theo các tỷ lệ: TX3CM7, TX5CM5, TX7CM3, TX10CM0. Thực hiện thí nghiệm đầm nén Proctor cải tiến (ASTM D1557) để xác định độ ẩm tối ưu, dung trọng khô lớn nhất, sau đó đo chỉ số chịu tải CBR ngâm nước bão hòa 4 ngày.

- Đối với bê tông xi măng mặt đường: Thiết kế hỗn hợp theo lý thuyết của ACI 211.1, với các mẫu thay thế xi măng bằng tro bay lần lượt: M0 (đối chứng), M15, M30. Đánh giá khả năng chịu nén (TCVN 3118) và điện lượng truyền qua kháng thấm clorua (ASTM C1202) từ 7 đến 90 ngày tuổi.

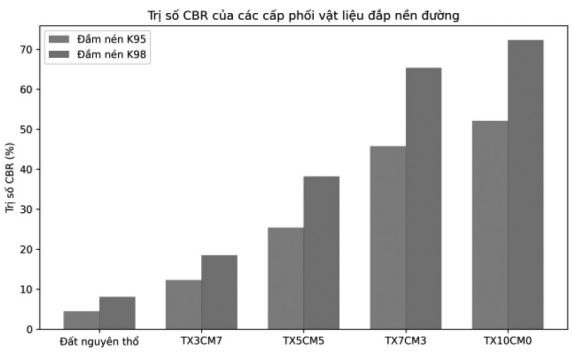
- Đánh giá vòng đời tích hợp (LCA): Công cụ LCA được áp dụng theo khuôn khổ ISO 14040/14044 để định lượng cường độ năng lượng tiêu thụ và phát thải CO2 tương đương cho 1 Km đường K95 hoặc 1 m3 khối bê tông thành phẩm.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

4.1. Đặc tính đầm nén và sức chịu tải đột phá của hỗn hợp K95, K98

Kết quả từ thí nghiệm đầm nén Proctor cải tiến chỉ ra rằng, khi tăng tỷ lệ tro xỉ phối trộn, đặc biệt tại điểm tỷ lệ tối ưu TX7CM3 (70% tro xỉ, 30% cát mặn), dung trọng khô lớn nhất của hỗn hợp đạt đến giá trị cực đại. Mọi khoảng trống cơ học đã được lấp đầy tối đa.

Đáng kinh ngạc nhất là chỉ số sức chịu tải CBR, được trình bày trên Hình 1. Trong khi mẫu cát nguyên thủy chỉ đạt CBR khoảng 4.5% (không đạt chuẩn), hỗn hợp TX7CM3 đã bứt phá đạt giá trị CBR đỉnh ở 45.8% (áp dụng đầm nén K95) và vươn tới 65.4% (đầm nén K98).



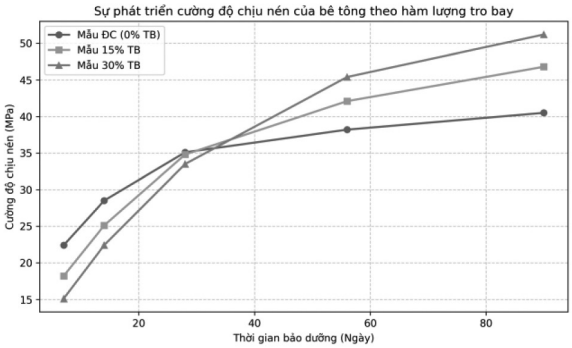
Hình 1. Chỉ số sức chịu tải CBR của hỗn hợp tro xỉ - cát mặn

Sự gia tăng này không những vượt xa chuẩn quy định tối thiểu của nền K95 (6%) và K98 (8%) hàng chục lần, mà còn đáp ứng được mọi chỉ tiêu khắt khe nhất dành cho lớp móng phụ cấp cao (Subbase). Điều này mở ra khả năng tiết giảm chi phí vô cùng lớn cho các kết cấu áo đường phía trên.

4.2. Cường độ cơ học của bê tông xi măng hàm lượng tro bay cao

Việc thay thế một lượng lớn xi măng bằng tro bay (tỷ lệ 30%) trong cấp phối M350 tạo ra động học phản ứng thủy hóa đặc trưng. Biểu đồ Hình 2 theo dõi quá trình phát triển cường độ chịu nén đơn trục từ 7 đến 90 ngày tuổi.

Trong 14 ngày đầu, mẫu M30 phát triển cường độ khá chậm, chỉ đạt khoảng 67% sức chịu tải nội tại của mẫu M0 (đối chứng). Điều này là do lượng



Hình 2. Sự phát triển cường độ chịu nén của bê tông theo thời gian

xi măng bị giảm nên lượng C-S-H sinh ra ở pha thủy hóa sơ cấp ít. Tuy nhiên, sau 28 ngày, phản ứng pozzolanic bùng nổ, tiêu thụ vôi tự do biến thành gel C-S-H thứ cấp bền vững.

Ở tuổi 90 ngày, mẫu M30 ghi nhận cường độ 51.2 MPa, cao hơn mẫu M0. Đáng lưu ý, do thủy hóa chậm, nhiệt lượng sinh ra trong 72 giờ đầu được giảm thiểu đáng kể, giải quyết triệt để vấn đề nứt vỡ do ứng suất nhiệt nội tại trong quá trình thi công bê tông khối lớn.

4.3. Đặc tính kháng xâm thực ion clorua

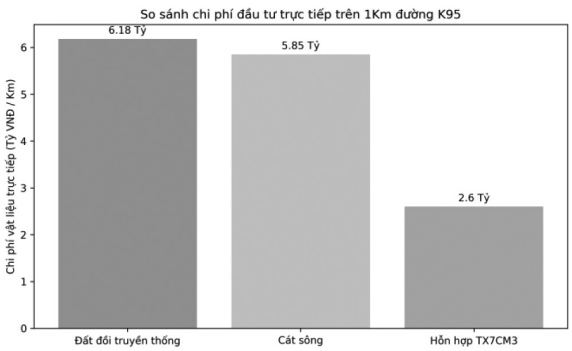
Thí nghiệm đo điện lượng truyền qua (RCPT - ASTM C1202) ở 56 ngày tuổi cho thấy sự suy giảm độ thấm clorua theo cấp số nhân. Mẫu M30 ghi nhận chỉ 850 Coulombs (mức Rất thấp), trong khi mẫu M0 vượt ngưỡng 2200 Coulombs (Trung bình). Các gel C-S-H thứ cấp đã phong tỏa hệ thống giao thông mao quản vi mô, cản trở di chuyển của các ion ăn mòn, nâng cao vượt bậc tuổi thọ khai thác của mặt đường cứng.

5. HIỆU QUẢ KINH TẾ - KỸ THUẬT VÀ MÔI TRƯỜNG

5.1. Phân tích tối ưu hóa chi phí vòng đời dự án (LCC)

Khảo sát kinh tế tại khu vực ĐBSCL chỉ ra rằng, chi phí vận chuyển là nguyên nhân chính đội giá các vật liệu tự nhiên như đất đồi (chở từ An Giang, Đồng Nai về Trà Vinh). Phân tích LCC tập trung vào sự khác biệt chi phí trực tiếp này.

Hình 3 mô tả phân tích dự toán cho 1 Km nền đường K95. Việc ứng dụng cấp phối TX7CM3 giúp

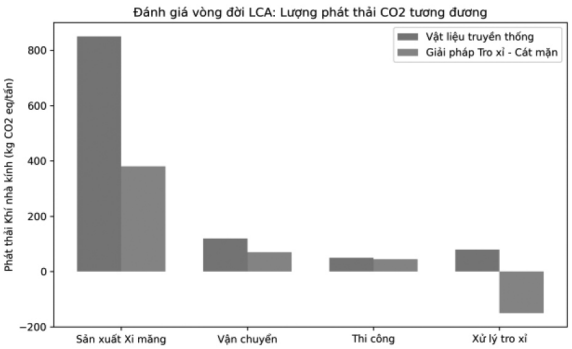


Hình 3. Tương quan so sánh chi phí vật tư đầu tư trực tiếp trên 1Km

bốc hơi một nửa chi phí, đưa suất đầu tư vật tư trực tiếp từ 6.18 tỷ VNĐ (đất đồi) lao thẳng xuống mức khiêm tốn 2.6 tỷ VNĐ. Con số tiết kiệm khổng lồ 88% này đến từ việc tro xỉ có giá gần như bằng 0 và được khai thác tại chỗ. Thêm vào đó, thời gian và số lượt ca máy lu lèn giảm từ 15-20% nhờ tính chất dễ thi công của hỗn hợp.

5.2. Đánh giá vòng đời (LCA) sinh thái

Phân tích LCA tuân thủ khuôn khổ ISO 14040 đã cho thấy sự phục hồi sinh thái tích cực từ mô hình tái sử dụng tro xỉ.



Hình 4. Phân tích độ lớn phát thải CO2 tương đương theo vòng đời

Nhờ loại trừ quá trình nung đá vôi (tránh phát thải carbon từ sản xuất xi măng) và tránh việc hình thành khí metan từ bãi chôn lấp, hỗn hợp tro xỉ - cát mặn cắt giảm 55% lượng phát thải CO_2 khí nhà kính trên quy mô tổng thể.

Hơn nữa, nó giúp tiết kiệm 40% năng lượng khai thác, giảm 96% áp lực diện tích lưu trữ rác thải rắn cho nhà máy điện. Các thử nghiệm ngâm chiết kim loại nặng đều trả về chỉ số rò rỉ dưới mức giới hạn an toàn của QCVN 07:2009/BTNMT từ 10 đến 50 lần, đảm bảo không gây ô nhiễm nguồn nước ngầm sinh hoạt.

6. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Qua các phân tích chuyên sâu lý thuyết và thực nghiệm, nghiên cứu đã chứng minh tính khả thi, hiệu quả kinh tế và độ an toàn sinh thái của việc dùng tro xỉ kết hợp cát mặn.

1. Về Kỹ thuật: Phối trộn 70% tro xỉ và 30% cát mặn tạo ra cấp phối TX7CM3 siêu việt, đạt CBR từ 45.8% đến 65.4%, đáp ứng hoàn hảo tiêu chuẩn lớp đắp K95, K98. Việc thay thế 30% xi măng bằng tro bay giúp bê tông đạt 51.2 MPa ở tuổi 90 ngày, khắc phục nứt gãy nhiệt và có hệ số thấm clorua rất thấp.

2. Về Kinh tế: Giảm 88% giá thành đầu tư vật liệu đắp nền so với đất đồi truyền thống và hạ nhiệt 25% giá thành cấp phối bê tông, tháo gỡ điểm nghẽn vật liệu khan hiếm tại ĐBSCL.

3. Về Môi trường: Đánh giá định lượng LCA khẳng định giải pháp này giúp cắt giảm 55% phát thải

khí nhà kính (CO_2), bảo vệ hệ sinh thái sông ngòi khỏi nguy cơ sạt lở do ngừng khai thác cát tự nhiên.

Kiến nghị: Bộ Xây dựng cần nhanh chóng ban hành các Tiêu chuẩn kỹ thuật và định mức kinh tế chuyên biệt cho loại vật liệu tái sinh này, làm cơ sở đẩy mạnh ứng dụng trong các dự án cao tốc tại ĐBSCL.❑

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Chính phủ (2020), Nghị quyết số 136/NQ-CP về định hướng phát triển bền vững quốc gia.

[2] Quyết định số 1658/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh.

[3] Báo cáo mã số SP8 (2026), Đánh giá hiệu quả kinh tế - kỹ thuật và môi trường vật liệu đắp K95, K98.

[4] Báo cáo mã số SP9 (2026), Ứng dụng giải pháp công nghệ phối hợp tro xỉ nhiệt điện và cát nhiễm mặn.

[5] TCVN 9436:2012, Nền đường ô tô - Quy phạm thi công và nghiệm thu kỹ thuật.

[6] ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan.

[7] ISO 14040:2006, Quản lý môi trường - Đánh giá vòng đời (LCA) - Nguyên lý và Khuôn khổ kỹ thuật.

NGHIÊN CỨU SỰ ĂN MÒN CỐT THÉP TRONG VIỆC GIÁM SÁT SỨC KHỎE...

Tiếp theo trang 95

pháp này.Nghiên cứu đã đạt được mục tiêu khoa học chính là xác định và thử nghiệm một phương pháp tích hợp hỗ trợ bởi AI và IoT để giám sát không phá hủy sự ăn mòn trong bê tông cốt thép. Khung làm việc này có thể định hướng cho các nghiên cứu tương lai nhằm tiêu chuẩn hóa hệ thống SHM cho các ứng dụng thành phố thông minh.❑

Tài liệu tham khảo

[1] Almeida, H.F., Higor, F.A., Wilson, F. 2024. Responsabilidade civil e justiça ambiental no caso da contaminação química do Rio Tocantins após o colapso da ponte rodoviária. Humanidades and Inovação 11.9, 65-75.6.

[2] Alonso, L., Barbarán, J., Chen, J., Díaz, M., Llopis, L., Rubio, B. 2017. Middleware and communication technologies for structural health monitoring of critical infrastructures: A survey. Computer Standards and Interfaces, 56, 83 100.

[3] H. Lingard, T. Cooke, G. Zelic, J. Harley, A qualitative analysis of crane safety incident causation in the Australian construction industry, Saf. Sci. 133 (2021) 105028. [4] T. Huo, M. Tang, W. Cai, H. Ren, B. Liu, X. Hu, Provincial total-factor energy efficiency considering floor space under construction: An empirical analysis of China's construction industry, J. Clean. Prod. 244 (2020) 118749.

[4] Chady, T., Frankowski, P., Waszczuk, P., Zieliński, A. 2018. Evaluation of reinforced concrete structures using the electromagnetic method. AIP Conference Proceedings, 1949, 040004.

[5] Frankowski, P.K., Chady, T. 2023. Evaluation of Reinforced Concrete Structures with Magnetic Method and ACO (Amplitude-Correlation-Offset) Decomposition. Materials, 16(16), 5589.

[6] Frankowski, P.K., Chady, T., Zieliński, A. 2021. Magnetic force induced vibration evaluation (M5) method for frequency analysis of rebar-debonding in reinforced concrete. Measurement, 182.

TRUNG BÌNH HÓA NGUY CƠ SẠT LỞ ĐẤT Ở ĐƠN VỊ HÀNH CHÍNH...

Tiếp theo trang 99

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1.Acharya, G., De Smedt, F., Long, NT., 2006. Assessing landslide hazard in GIS: a case study from Rasuwa, Nepal, Bull Eng Geol Environ 65:99–107

2.Carrara A, Cardinali M, Guzzetti F, Reichenbach P., 1995. GIS technology in mapping landslide hazard, In: Carrara A, Guzzetti F (eds) Geographical information systems in assessing natural hazards, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 135–175

3.Hoàng Việt Hùng (chủ nhiệm) (2025).Nghiên cứu xây dựng công nghệ cảnh báo nguy cơ lũ quét, sạt lở đất vùng Trung Trung Bộ. Đề tài Khoa học Công nghệ cấp Bộ Nông nghiệp và Môi trường, mã số ĐTKHCN.15/33/23.

4.Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy, Geomorphol 31:181–216.

5.Kayastha P., 2006. Slope stability analysis using GIS on a regional scale, Dissertation, Vrije Universiteit Brussel.

6.Vinh BL., 2007. Regional slope instability zonation using different GIS techniques, Vrije Universiteit Brussel

7.Hòa, Trịnh Xuân., và nnk. 2019. Báo cáo "Điều tra hiện trạng trượt lở đất đá tỷ lệ 1:50.000 tỉnh Quang Trị", Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, Hà Nội.

8.Long NT., 2008. Landslide susceptibility mapping of the mountainous area in A Luoi. Doctoral Thesis in Vrije Brussel University, Bengium.

9.Montgomery DR, Dietrich WE., 1994. A physically–based model for the topographic control on shallow landsliding, Water Resour Res 30:1153–1171

10.Ray RL, De Smedt F., 2009. Slope stability analysis on a regional scale using GIS: a case study from Dhading, Nepal, Environ Geol 57:1603–1611

11.Wu W, Sidle RC., 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins, Water Resour Res 31:2097–2110.

12.Pack, R. T., D. G. Tarboton, C. N. Goodwin, A. Prasad, (2005), "SINMAP 2. A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, technical description and users guide for version 2.0," Utah State University.