

NGHIÊN CỨU SỰ ẪN MÒN CỐT THÉP TRONG VIỆC GIÁM SÁT SỨC KHỎE KẾT CẤU BÊ TÔNG CỐT THÉP CHO ĐÔ THỊ THÔNG MINH

RESEARCH ON STEEL REINFORCEMENT COROSION IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF REINFORCED CONCRETE FOR SMART CITIES

➤ **Ths. Trần Văn Một** - Trường Đại học Xây dựng Miền Trung.

Điện thoại: 0964957070 - Email: tranvanmot@muce.edu.vn

➤ **Ths. Bùi Hữu Lâm** - Trường Đại học Xây dựng Miền Trung

➤ **Ths. Lê Quý Hòa** - Trường Đại học Xây dựng Miền Trung

Tóm tắt: Mô hình "Thành phố thông minh" nhấn mạnh nghĩa vụ giám sát và bảo vệ các cơ sở hạ tầng trọng yếu, bao gồm các tòa nhà, cầu, đường hầm và mạng lưới giao thông trong suốt vòng đời phục vụ của chúng, bởi những hỏng hóc bất ngờ có thể gây ra tổn thất thảm khốc về người và thiệt hại lớn về kinh tế. Giám sát sức khỏe cấu trúc (SHM) đáp ứng nhu cầu này thông qua sự giao thoa liên ngành giữa kỹ thuật xây dựng, cơ khí, điều khiển và máy tính bằng cách cung cấp các chẩn đoán kịp thời, cho phép bảo trì chủ động và ngăn chặn các hư hỏng nghiêm trọng. Bảo vệ cốt thép khỏi bị ăn mòn là nhiệm vụ cấp thiết trong thành phố thông minh.

Từ khóa: Bê tông cốt thép, giám sát ăn mòn, thử nghiệm không phá hủy, giám sát tình trạng kết cấu, IoT, phương pháp M5.

Đặt vấn đề

Các thành phố thông minh là trọng tâm chính trong chương trình nghị sự của Liên minh Châu Âu (EU), được hỗ trợ bởi các sáng kiến như Thị trường Thành phố Thông minh (Smart Cities Marketplace) - nơi kết nối các thành phố, ngành công nghiệp và các nhà nghiên cứu, đồng thời cung cấp hỗ trợ về kỹ thuật và tài chính. Sứ mệnh của EU mang tên "100 Thành phố Thông minh và Trung hòa Khí hậu vào năm 2030" nhằm giúp các thành phố đạt được trạng thái trung hòa khí hậu. Sự hợp tác được khuyến khích thông qua mạng lưới Cộng đồng Thông minh (Smart Communities), và các công cụ kỹ thuật số như Bản sao số (Digital Twins) đang được phát triển để giải quyết các thách thức đô thị. Những nỗ lực này kết hợp giữa chính sách, nguồn vốn, công nghệ và sự tham gia của người dân để thúc đẩy phát triển đô thị đổi mới và bền vững. Một trở ngại đáng kể đối với sự phát triển thành phố thông minh là sự ăn mòn bê tông cốt thép, dẫn đến nhiều sự cố xây dựng, tổn thất tài chính lớn và thiệt hại về môi trường. Sự ăn mòn cốt thép trong các kết cấu bê tông cốt thép (RC) vẫn là một thách thức lớn đối với ngành xây dựng và sự phát triển của các đô thị thông minh

Abstract: The "Smart City" model emphasizes the obligation to monitor and protect critical infrastructure-including buildings, bridges, tunnels, and transportation networks-throughout their service life, as unexpected failures can lead to catastrophic loss of life and massive economic damage. Structural Health Monitoring (SHM) addresses this need through an interdisciplinary intersection of civil, mechanical, control, and computer engineering by providing timely diagnostics, enabling proactive maintenance, and preventing severe failures. Protecting reinforcement steel from corrosion is an urgent task within the smart city framework.

Keywords: Reinforced concrete, corrosion monitoring, non-destructive testing, structural health monitoring, IoT, M5 method.

1. Tình hình nghiên cứu

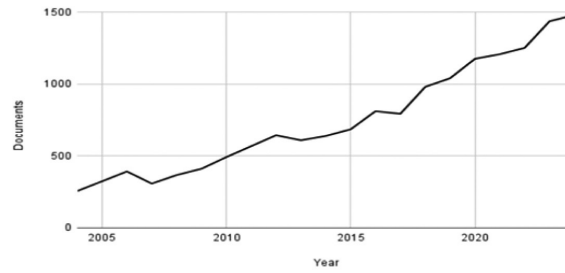
Theo báo cáo từ Cục Đường bộ Liên bang (Hoa Kỳ) và Hiệp hội Quốc tế các Kỹ sư Ăn mòn (NACE), khoảng 30% các tòa nhà dân cư đã có dấu hiệu hư hỏng do ăn mòn, với chi phí sửa chữa chiếm khoảng 15% tổng chi phí vận hành của các cơ sở dân cư. Trên toàn cầu, tác động kinh tế là vô cùng lớn, với tổn thất hàng năm ước tính khoảng 2,5 nghìn tỷ USD - tương đương khoảng 3,2% GDP thế giới (Koch và cộng sự, 2016; Koch và cộng sự, 2002; Chang, 2017; Frankowski và cộng sự, 2021). Các vấn đề tương tự cũng phổ biến ở các nước phát triển khác, nơi chi phí do ăn mòn bê tông cốt thép (RC) thường dao động từ 1% đến 3% GDP. Tại Hoa Kỳ, chi phí này lên tới 276 tỷ USD hàng năm (3,1% GDP) tại Thụy Sĩ, riêng chi phí sửa chữa được ước tính từ 6,6 đến 26,3 tỷ CAD mỗi năm. Và tại Nhật Bản, các khoản chi phí tổng cộng khoảng 1,02% GDP, tương đương 5.258 tỷ yên. Vượt ra ngoài những tổn thất về tài chính, ăn mòn còn dẫn đến các hỏng hóc về cấu trúc có thể gây ra tai nạn và tử vong, đồng thời đẩy nhanh quá trình cạn kiệt tài nguyên và góp phần làm tăng lượng khí thải gây hiệu ứng nhà kính. Đáng chú ý, môi trường xây dựng chiếm tới 39% lượng phát thải CO2 toàn cầu

Các động lực chính bao gồm việc áp dụng các hệ thống IoT-SHM, những tiến bộ trong công nghệ cảm biến để kiểm tra không phá hủy, và sự tích hợp của các phương pháp truyền thông như 5G, LoRaWAN, NB-IoT và liên kết vệ tinh, cùng với nhu cầu ngày càng tăng đối với việc kiểm tra xây dựng dựa trên bản sao số (digital twin). Việc phớt lờ sự ăn mòn trong các cấu trúc như vậy có thể gây ra những rủi ro an toàn nghiêm trọng. Các sự cố gây chấn động như vụ sập cầu Laval ở Canada khiến 5 người thiệt mạng, và thảm họa cầu cạn Genoa năm 2018 ở Ý làm 43 người chết và 566 người mất nhà cửa đã làm nổi bật những mối nguy hại đối với tính mạng con người và đẩy lên mối lo ngại trong công chúng.

Tuy nhiên, những tai nạn như vậy vẫn xảy ra hàng năm, ngay cả ở các nước phát triển cao. Ví dụ như sự cố cầu Carola ở Dresden vào năm 2024. Cùng năm đó, một sự cố môi trường cũng đã xảy ra: một cây cầu ở Brazil bị sập, và khi rơi xuống sông, các tàu chở dầu đã giải phóng hàng tấn chất độc hại ra môi trường. Những sự kiện này đang diễn ra. Nhu cầu sửa chữa và tái thiết làm tăng mức tiêu thụ vật liệu và lượng phát thải CO₂ điều này mâu thuẫn với các mục tiêu phát triển bền vững. Do đó, việc phòng ngừa và phát hiện sớm sự ăn mòn là điều thiết yếu để kéo dài tuổi thọ công trình và giảm thiểu các tác động môi trường. Mặc dù bê tông cốt thép đã là vật liệu xây dựng chính trong hơn một thế kỷ qua, nhiều cấu trúc được xây dựng trong những thập kỷ gần đây vẫn thiếu sự bảo vệ chống ăn mòn thỏa đáng, đòi hỏi phải có quá trình giám sát sâu. Sự quan tâm đến vấn đề này đã tăng trưởng nhanh chóng, được thể hiện qua số lượng ngày càng tăng các công bố khoa học được lập chỉ mục trong Scopus (truy vấn: “corrosion” AND “reinforced concrete” OR “RC structures” OR “rebar” OR “concrete cover”), vốn đã tăng đáng kể trong giai đoạn từ 2004 đến 2024 (Hình 1)

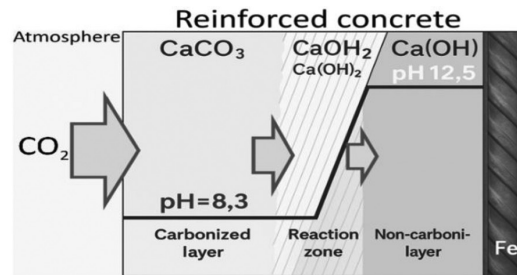
Các quyết định liên quan đến cơ sở hạ tầng bê tông cốt thép (RC) đang xuống cấp phải được đưa ra trong một khung thời gian hạn hẹp để tránh việc đóng cửa tốn kém và các sự cố hỏng hóc, đồng thời cố gắng kéo dài tuổi thọ và giảm phát thải. Các đợt kiểm tra định kỳ, chẳng hạn như thử nghiệm súng bật nảy Schmidt được thực hiện 5 năm một lần, chỉ cung cấp dữ liệu gián tiếp và không thể phát hiện trực tiếp sự ăn mòn cốt thép. Việc sử dụng các phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT) chính xác có thể tiết kiệm hàng tỷ đô la và cứu sống nhiều người. Vì vậy, việc phát triển các công cụ chẩn đoán tiên tiến cho bê tông cốt thép là một ưu tiên toàn cầu. Những giải pháp như vậy sẽ cải thiện độ bền, giảm sử dụng vật liệu, hạ thấp lượng khí thải và hỗ

trợ các chiến lược phát triển bền vững cũng như bảo vệ khí hậu.



Hình 1: Xu hướng công bố các nghiên cứu ăn mòn trong bê tông cốt thép (Dữ liệu Scopus) 2004-2024

Quá trình carbon hóa xảy ra khi khí CO₂ trong khí quyển thâm nhập vào bê tông và phản ứng với canxi hydroxit Ca(OH)₂, tạo thành canxi cacbonat CaCO₃ và nước. Các phản ứng tương tự có thể liên quan đến các ion khác và các chất ô nhiễm có tính axit (Frankowski và cộng sự, 2021; Rimshin, Truntov, 2019). Khi quá trình này tiến triển, độ pH của bê tông giảm xuống, làm giảm tính kiềm và phá hủy lớp thụ động (passive layer) vốn có tác dụng bảo vệ các thanh cốt thép khỏi bị ăn mòn (Wegen và cộng sự, 2012; Rimshin và Truntov, 2019). Sự mất đi lớp bảo vệ này được minh họa trong Hình 2



Hình 2. Cơ chế thâm nhập cacbonat vào các lớp bê tông cốt thép

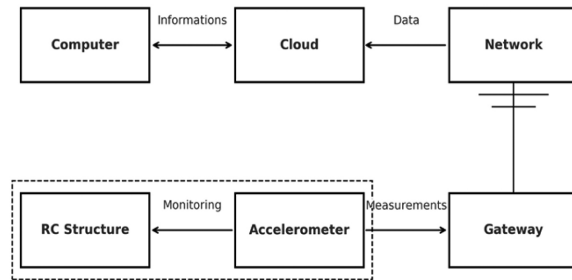
Thông thường, lớp bê tông bảo vệ cung cấp độ kiềm cao giúp ngăn chặn các ion clorua, oxit lưu huỳnh và CO₂ gây ra sự ăn mòn. Tuy nhiên, theo thời gian, quá trình carbon hóa làm giảm độ pH và dần dần làm yếu đi lớp bảo vệ này. Khi mặt trước của quá trình carbon hóa chạm tới cốt thép, độ ẩm và các chất ô nhiễm có thể gây ra sự ăn mòn và hình thành rỉ sét. Các yếu tố môi trường như độ ẩm không khí, thành phần bê tông và mức độ chất ô nhiễm ảnh hưởng lớn đến tốc độ carbon hóa, vốn có xu hướng tăng cao trong những môi trường này. Sự ăn mòn làm giảm diện tích mặt cắt ngang của thanh thép, làm yếu khả năng bám dính và giảm khả năng chịu tải của nó, gây ra những rủi ro an toàn nghiêm trọng. Sự hình thành các oxit sắt (rỉ sét), vốn có thể có thể tích gấp mười lần thể tích thép ban đầu, tạo ra các ứng suất nội bộ gây ra các

so sánh với tiêu đề và tóm tắt của từng bài báo bằng cách sử dụng các mô hình nhúng (embeddings) và khoảng cách cosine, từ đó tạo ra một bảng xếp hạng mức độ liên quan. Công cụ hỗ trợ cả các mô hình nhúng miễn phí và thương mại (Matysik và cộng sự, 2025). Dựa trên bảng xếp hạng này, nhà nghiên cứu lựa chọn một tập hợp các ấn phẩm mục tiêu, dưới sự hướng dẫn của ma trận độ tương đồng và các chỉ số thư mục (bibliometric indicators).

Phương pháp này kết hợp các mô hình nhúng với 11 thước đo thư mục, cho phép lọc dữ liệu một cách khách quan và hiệu quả, đồng thời giảm thiểu định kiến chủ quan của nhóm nghiên cứu. Nó tạo điều kiện cho việc nhận diện và phân tích nhanh chóng các bài báo có liên quan. Các bài đánh giá tài liệu có hệ thống đóng vai trò quan trọng trong việc ngữ cảnh hóa nghiên cứu thực nghiệm, đánh giá kiến thức hiện tại, xác định các lỗ hổng và đảm bảo tính minh bạch trong cả nền tảng lý thuyết lẫn phương pháp luận. Một quy trình SLR cũng giúp giảm thiểu định kiến lựa chọn, ghi chép rõ ràng quá trình ra quyết định và tổng hợp các phát hiện để phân biệt giữa các bằng chứng đã được xác nhận và các khu vực còn mơ hồ hoặc thiếu sót. Kết quả là, nó cung cấp các khung khái niệm mạnh mẽ và các lựa chọn phương pháp luận được tinh chỉnh phù hợp với câu hỏi nghiên cứu. Kết quả SLR cho thấy phương pháp M5 là lựa chọn tối ưu cho một hệ thống SHM được thiết kế để phát hiện sự ăn mòn trong các kết cấu bê tông cốt thép. Những thay đổi như khuyết tật, sự xuống cấp hoặc biến đổi vật liệu sẽ ảnh hưởng đến các tần số này theo những cách thức đặc trưng. Mặc dù nghiên cứu này tập trung cụ thể vào sự mất bám dính do cốt thép bị rỉ sét trong bê tông cốt thép, phân tích rung động cũng có thể xác định nhiều dạng hỏng hóc khác. Hệ thống M5 được đề xuất nhằm mục đích giám sát ăn mòn nhưng có thể mở rộng thành một công cụ chẩn đoán RC toàn diện. Hệ thống có thể vận hành ở hai chế độ: phiên bản chủ động cho các đợt kiểm tra định kỳ và mạng lưới IoT-SHM thụ động để giám sát liên tục.

Quy trình bắt đầu từ máy tính điều khiển, nơi tạo ra tín hiệu kích thích và gửi đến hệ thống phụ kích thích. Hệ thống phụ này tạo ra một từ trường xoay chiều với tần số quét (sweeping frequency) xuyên qua mẫu RC và kích thích rung động trong các thanh cốt thép nằm bên trong. Rung động được tạo ra trực tiếp trong thanh cốt thép bằng một nam châm điện, sau đó truyền qua liên kết từ tính đến một nam châm gắn trên bề mặt, nam châm này được kết nối cơ học với một máy đo gia tốc địa chấn (seismic accelerometer). Máy đo gia tốc chuyển đổi các rung động này thành tín hiệu điện, sau đó gửi

ngược lại máy tính điều khiển để phân tích. Hệ thống vòng kín này đảm bảo phát hiện chính xác các sự dịch chuyển tần số do ăn mòn hoặc mất bám dính gây ra. Bằng cách tránh hiệu ứng giảm chấn mạnh của sóng cơ học trong bê tông, phương pháp M5 cho phép đánh giá cốt thép trực tiếp và chính xác ở độ sâu lớp bảo vệ tiêu chuẩn (2-5 cm) mà không yêu cầu kiến thức trước về đặc tính động lực học của cấu trúc.



Hình 4: Sơ đồ khối của hệ thống M5 IoT-SHM

Để xác định mối liên hệ giữa sự xuất hiện của ăn mòn và những thay đổi trong tần số cộng hưởng (đặc tính tần số), các tác giả đã phát triển một phương pháp AI gọi là phân tích luật kết hợp (ARA). ARA là một kỹ thuật học máy được thiết kế để phân tích tín hiệu, đặc biệt là trong việc phát hiện ăn mòn trong các cấu trúc RC [1]. ARA có sẵn ở hai phiên bản: một phiên bản xử lý tín hiệu thô (RAW) và phiên bản còn lại hoạt động dựa trên đạo hàm của tín hiệu [2]. Phương pháp này kiểm tra tần suất của các thay đổi cụ thể trong tần số cộng hưởng xảy ra khi có sự ăn mòn, như được mô tả bởi phương trình (1).

$$\text{conf}(A \rightarrow B) = \frac{\text{supp}(A \cup B)}{\text{supp}(A)} \approx P(B / A)$$

Trong phương trình (1), BODY (A) đại diện cho sự tiến triển của quá trình ăn mòn cốt thép trong cấu trúc RC, trong khi HEAD (B) chỉ ra sự thay đổi ở một tần số cụ thể trong đặc tính tần số. Độ tin cậy (Confidence) là một tham số định lượng xác suất mà toàn bộ quy tắc được áp dụng, dựa trên sự hiện diện của phần BODY. Một khía cạnh quan trọng khác của các hệ thống SHM là khả năng truyền thông. Những tiến bộ gần đây trong bộ thu phát vô tuyến (RF transceivers) và các nền tảng SHM cho phép truyền dữ liệu rung động theo thời gian thực từ các máy đo gia tốc phân tán [2]. Điều này hỗ trợ việc phân tích mô vận hành nhanh chóng đối với các cấu trúc đang hoạt động và quản lý dữ liệu quy mô lớn một cách hiệu quả. Một mạng lưới SHM dựa trên công nghệ M5 sử dụng các máy đo gia tốc được lắp đặt gần cốt thép để cung cấp khả năng giám sát nhạy bén và tiết kiệm chi phí cho

cả cốt thép và lớp bê tông bao quanh. Để đánh giá cốt thép, có thể sử dụng kích thích điện từ; đối với việc đánh giá bê tông, kích thích cơ học sẽ được áp dụng. Hệ thống cũng có thể vận hành ở chế độ thụ động mà không cần bất kỳ nguồn kích thích nào. Các cảm biến được khuyến nghị lắp đặt ngay trong quá trình xây dựng, với cách bố trí dạng lưới (grid arrangements) giúp tăng cường khả năng phát hiện ăn mòn. Việc giám sát tần số dài hạn có thể nhận diện ngay cả những thay đổi nhỏ nhất, từ đó cải thiện độ chính xác và độ nhạy.

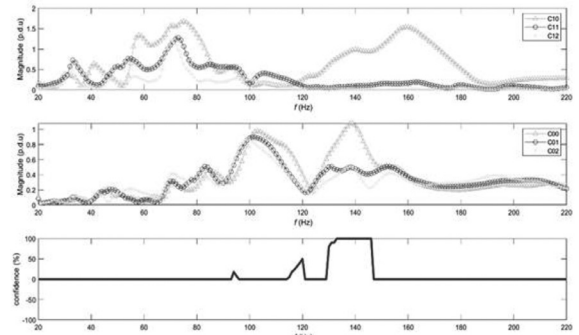
3. Kết quả nghiên cứu và Thảo luận

Lợi ích chính của việc tích hợp Internet Vạn vật (IoT) vào Giám sát Sức khỏe Cấu trúc (SHM) là sự cộng hưởng với Mô hình thông tin công trình (BIM), cho phép phát triển Bản sao số (Digital Twin - DT)[1]. Sự tích hợp này biến mô hình BIM tĩnh thành một DT động, đặc biệt là trong các giai đoạn sau xây dựng như vận hành và bảo trì. DT là các bản sao ảo liên tục đồng bộ hóa với dữ liệu thời gian thực từ các cảm biến IoT/SHM, hỗ trợ bảo trì dự báo thông qua các mô phỏng nâng cao.

Dựa trên kết quả đánh giá tài liệu có hệ thống (Frankowski và Matysik, 2025), phương pháp M5 là một lựa chọn phù hợp cho các hệ thống giám sát sức khỏe cấu trúc (SHM). Trong quá trình thử nghiệm, hai loại mẫu đã được kiểm tra: các mẫu được chuẩn bị trong phòng thí nghiệm với sự ăn mòn mô phỏng (C00, C01, C02) và các mẫu thực địa từ một bản mặt cầu đã tháo dỡ ở Świerkocin trên sông Warta tại Ba Lan (C10, C11, C12). Nghiên cứu đã kiểm tra các luật kết hợp liên quan trực tiếp đến sự ăn mòn bằng cách phân tích các đặc tính tần số của các mẫu C00-C01 và C10-C11, vốn là những dấu hiệu chỉ ra sự bắt đầu của sự ăn mòn, và các mẫu C01-C02 cùng C11-C12, những mẫu cho thấy sự tiến triển của quá trình này.

Phân tích ban đầu tập trung vào các thuộc tính phân tách ACO, cho phép đánh giá định lượng về cách thức ăn mòn ảnh hưởng đến Biên độ (Amplitude - A), Độ tương quan (Correlation - C) hoặc Độ lệch (Offset - O) trong các đặc tính tần số[3]. Các nghiên cứu trước đây xác nhận rằng ba tham số này mô tả tín hiệu một cách hiệu quả. Việc thử nghiệm được thực hiện trong phạm vi từ 20–220 Hz, nơi quan sát thấy các hiện tượng cộng hưởng mạnh. Sự ăn mòn có ảnh hưởng tối thiểu đến độ lệch (offset), trong khi sự khác biệt về biên độ chỉ xuất hiện khi các tham số khác cũng thay đổi. Các ví dụ về kết quả được hiển thị trong Hình 5

Phân tích tương quan cho thấy sự tương đồng yếu hơn giữa các mẫu bị ăn mòn (C01, C11) và các mẫu bị mất bám dính (C02, C12), nhưng lại có sự



Hình 5- Ảnh hưởng của việc thay đổi các thông số lên tín hiệu có thể được thấy trong hai trường hợp: các mẫu vật có lớp phủ bê tông lớn hơn và đa dạng hơn (30–50 mm) và các mẫu vật có lớp phủ mỏng hơn, gần như giống hệt nhau, khoảng 20 mm

tương đồng đáng kể hơn trong các nhóm chỉ thay đổi về mức độ ăn mòn (C00, C01, C02). Những sự khác biệt này bị ảnh hưởng bởi các yếu tố cấu trúc khác, chẳng hạn như kích thước, độ dày lớp bảo vệ hoặc loại cốt thép, trong các dòng mẫu bị ăn mòn và mất bám dính. Do đó, phân tích ARA đã được áp dụng, vì nó cho phép phát hiện các tần số bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn. Các tần số được xác định này có tính nhất quán trên cả mẫu phòng thí nghiệm và mẫu thực địa[6].

Hình 5 chứng minh rằng ngay cả những biến động nhỏ về độ dày lớp bê tông bảo vệ cũng có thể tác động đáng kể đến độ tương quan và biên độ, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc đo lường chính xác lớp bảo vệ trong các mẫu thử nghiệm. Điều này làm nổi bật một lợi thế then chốt của SHM so với các phương pháp kiểm tra định kỳ truyền thống. Biểu đồ độ tin cậy chỉ ra rằng sự ăn mòn ảnh hưởng đáng kể đến các tần số trong khoảng từ 130 đến 146Hz, một quy luật được quan sát thấy một cách nhất quán trên tất cả các trường hợp thử nghiệm. Tuy nhiên, vì có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính tần số, các thí nghiệm trước đây đã chỉ ra rằng việc phát hiện ăn mòn trong các mẫu chưa biết rõ thông tin là một thách thức, bởi các tác động bên ngoài có thể che lấp các tín hiệu ăn mòn. Điều này càng khẳng định tầm quan trọng của SHM trong việc xác định nhanh chóng và chính xác sự ăn mòn ở giai đoạn sớm. Dữ liệu thu thập được từ M5 được gửi về phòng điều khiển bằng kiến trúc Mạng Cảm biến Không dây (WSN) của hệ thống SHM để xuất, bao gồm năm tầng chính: Vật lý, Liên kết dữ liệu, Mạng, Giao vận và Ứng dụng[5]. Ngoài ra, WSN còn tích hợp ba mặt phẳng xuyên tầng (cross-layer planes) đóng vai trò thiết yếu trong việc quản lý năng lượng:

- *Mặt phẳng Quản lý Nguồn (Power Management Plane):* Tối đa hóa tuổi thọ pin bằng cách quản lý hoạt động của các mô-đun và các chiến lược tiết kiệm năng lượng.

- *Mặt phẳng Quản lý Tính di động (Mobility Management Plane)*: Giám sát sự di chuyển của các nút và mức tín hiệu, điều này rất quan trọng để phát hiện các thay đổi về cấu trúc.

- *Mặt phẳng Quản lý Tác vụ (Task Management Plane)*: Quyết định nút nào đang hoạt động hoặc ở chế độ ngủ để giảm thiểu tiêu thụ năng lượng trong khi vẫn đảm bảo chất lượng giám sát (Davis và Chang, 2012; Kocakulak và Butun, 2017).

Trong số các công nghệ truyền thông WSN, LPWAN (Mạng diện rộng công suất thấp) là thiết yếu, cung cấp khả năng truyền thông tầm xa với mức tiêu thụ điện năng tối thiểu. Các tiêu chuẩn đáng chú ý bao gồm:

- *NB-IoT*: Sử dụng mạng di động để truyền dữ liệu tin cậy mà không yêu cầu thêm các cổng kết nối (gateways) bổ sung, giúp việc kết nối với các nền tảng điện toán đám mây trở nên đơn giản.

- *LoRaWAN*: Sử dụng kỹ thuật điều chế trải phổ Chirp (Chirp Spread Spectrum) để truyền thông tầm xa trong các băng tần không cấp phép, hoàn hảo cho việc giám sát các cấu trúc quy mô lớn ở những khu vực có vùng phủ sóng di động hạn chế.

- *LPWAN*: Các giải pháp LPWAN đang dần thay thế các lựa chọn thay thế WPAN cũ hơn như ZigBee nhờ vào phạm vi phủ sóng và tuổi thọ pin vượt trội (Alonso và cộng sự, 2017).

- Sơ đồ khối của hệ thống M5-SHM được trình bày trong Hình 4

Việc phát hiện sớm sự ăn mòn trong các kết cấu bê tông cốt thép (RC) là yếu tố sống còn cho sự phát triển của các đô thị thông minh. Bằng cách cho phép can thiệp kịp thời trước khi những hư hại nghiêm trọng xảy ra, chiến lược chủ động này giúp giảm chi phí bảo trì, kéo dài tuổi thọ cơ sở hạ tầng và nâng cao an toàn cho người dân. Nó cũng thúc đẩy sự tăng trưởng đô thị bền vững bằng cách giảm thiểu sử dụng tài nguyên và tránh các đợt sửa chữa khẩn cấp tốn kém. Việc đánh giá ăn mòn trong các cấu trúc RC là một nhiệm vụ cấp bách và mang tính quyết định. Các kỹ thuật kiểm tra không phá hủy (NDT) hiện nay vẫn chưa cung cấp được một phương pháp trực tiếp, nhanh chóng và đáng tin cậy để đo lường mức độ ăn mòn. Phương pháp M5 mang đến một giải pháp tiên phong với tiềm năng ứng dụng rộng rãi [4]. Kỹ thuật đổi mới này thúc đẩy hạ tầng bền vững bằng cách giảm thiểu các đợt kiểm tra mang tính phá hủy và kéo dài tuổi thọ của các công trình bê tông. Việc tích hợp phương pháp M5 với các hệ thống giám sát sức khỏe cấu trúc (SHM) giúp nâng cao hiệu quả của nó. Sử dụng kích thích điện từ cho phép đánh giá chi tiết cốt thép, trong khi kích thích cơ học cung cấp cái nhìn sâu sắc về tình trạng của chính khối bê tông. Thêm

vào đó, phương pháp M5 có thể vận hành thụ động bằng cách phát hiện các sự dịch chuyển tần số vốn là tín hiệu cảnh báo các vấn đề về cấu trúc. Khả năng này cho phép thực hiện bảo trì chủ động, cuối cùng là giảm thiểu tác động môi trường và thúc đẩy một môi trường xây dựng kiên cố hơn.

4. Kết luận, Đề xuất và Kiến nghị

Quá trình đánh giá tài liệu có hệ thống (SLR) đã xác định rõ một lỗ hổng nghiên cứu trong việc chẩn đoán không xâm lấn và nhạy bén đối với sự ăn mòn cốt thép sớm trong bê tông. Trong số các phương pháp mới, cách tiếp cận M5 đặc biệt hứa hẹn cho các hệ thống kiểm tra không phá hủy (NDT) và giám sát sức khỏe cấu trúc (SHM) trong môi trường Thành phố Thông minh. Khi được thu nhỏ và kết nối thông qua IoT, M5 có thể đưa ra các cảnh báo rủi ro chủ động và tăng cường bảo trì cơ sở hạ tầng, góp phần phát triển các đô thị kiên cố và bền vững. Kết quả cho thấy M5 có thể trở thành kỹ thuật then chốt cho hệ thống SHM của bê tông cốt thép, cải thiện phương pháp phân tích mô truyền thống bằng cách tập trung trực tiếp vào sự ăn mòn cốt thép. Điều này không chỉ xác nhận kiến thức hiện tại về sự thay đổi tần số cộng hưởng liên quan đến khuyết tật mà còn chứng minh tính linh hoạt của nó trong việc phát hiện sự xuống cấp sớm. Bằng cách giảm thiểu nhu cầu sửa chữa tốn kém tài nguyên và kéo dài tuổi thọ sử dụng, M5 thúc đẩy quản lý hạ tầng bền vững. Tuy nhiên, những phát hiện này vẫn mới chỉ là bước đầu. Cần có thêm nhiều thử nghiệm trong phòng thí nghiệm và ứng dụng thực tế để xác minh độ tin cậy. Kết hợp hệ thống SHM với IoT là bước đi quan trọng hướng tới việc giám sát thông minh và linh hoạt, giúp các cấu trúc đô thị an toàn và bền vững hơn trong kỷ nguyên số.

Các hướng nghiên cứu và khuyến nghị

Nghiên cứu tương lai: Cần tập trung vào các nghiên cứu kiểm soát trong phòng thí nghiệm để xác minh độ nhạy của phương pháp M5 đối với các giai đoạn ăn mòn khác nhau. Đồng thời, các ứng dụng thí điểm trên các cấu trúc thực tế là cần thiết để chứng minh tính khả thi trong điều kiện thực tế.

Tích hợp hệ thống: Rất khuyến khích việc tích hợp SHM dựa trên M5 với các nền tảng IoT để thực hiện giám sát thời gian thực, liên tục trong các Thành phố Thông minh.

Hợp tác liên ngành: Sự phối hợp giữa các kỹ sư, nhà khoa học vật liệu và chuyên gia hạ tầng số sẽ đóng vai trò quyết định trong việc đẩy nhanh quá trình tiêu chuẩn hóa và áp dụng rộng rãi phương

Xem tiếp trang 103

khí nhà kính (CO₂), 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, N.T., 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 B.L., 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 N.T., 2008. Landslide susceptibility mapping of the mountainous area in A Luoi. Doctoral Thesis in Vrije Brussel University, Belgium.
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.