

**ĐÁNH GIÁ MÔ HÌNH ẪN MÒN KẾT CẤU BÊ TÔNG CỐT THÉP PHÙ HỢP
VỚI ĐIỀU KIỆN KHÍ HẬU BIỂN VIỆT NAM**
EVALUATION OF CORROSION MODEL OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES
SUITABLE FOR VIETNAM'S SEA CLIMATE CONDITIONS

**TRẦN XUÂN VINH^a, PHẠM NGỌC MINH^a, TRẦN NGỌC LONG^{a,*}, NGUYỄN XUÂN HIỆU^a,
ĐẶNG KHẮC NAM^b**

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Vinh

^bTrường cao đẳng Việt Đức Nghệ An

*Tác giả đại diện: Email: longvinhuni@gmail.com

Ngày nhận 18/8/2025, Ngày sửa 09/9/2025, Chấp nhận 11/9/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol3-6>

Tóm tắt: Bài báo này trình bày về hiện tượng suy giảm chất lượng bê tông theo thời gian. Việc nghiên cứu, đánh giá sự suy giảm này là cần thiết và quan trọng, nhằm phục vụ công tác xác định khả năng chịu lực của kết cấu cũng như dự báo tuổi thọ công trình. Chất lượng bê tông biến đổi theo thời gian chịu tác động của nhiều yếu tố: chất lượng ban đầu, điều kiện môi trường xung quanh (nhiệt độ, độ ẩm), sự xâm nhập của ion Cl^- , CO_2 , quá trình cacbonat hóa, điều kiện khu vực,... Những yếu tố này khiến việc kiểm soát hay nghiên cứu sự suy giảm chất lượng bê tông trở thành một vấn đề phức tạp. Chính vì vậy, vấn đề này đã sớm thu hút sự quan tâm của nhiều nhà khoa học, với nhiều mô hình đã được xây dựng, chẳng hạn như: mô hình tuyến tính (Linear degradation model), mô hình suy giảm do ăn mòn cốt thép (Corrosion-induced degradation models), mô hình dựa trên xác suất (Probabilistic degradation models), các mô hình theo tiêu chuẩn Eurocode và FIB Model Code, mô hình tích hợp cơ học – hóa học – môi trường (Mechanistic-based models),... Mỗi mô hình đều có những ưu điểm, hạn chế riêng cũng như phạm vi và điều kiện áp dụng cụ thể. Tuy nhiên, để áp dụng một mô hình cụ thể nào đó trong điều kiện Việt Nam nhằm đánh giá chất lượng bê tông thì cần có các nghiên cứu nghiêm túc. Mục đích nghiên cứu là hướng đến đánh giá và đề xuất mô hình phù hợp điều kiện Việt Nam.

Từ khóa: Bê tông, sự suy giảm, tuổi thọ, ăn mòn, môi trường xung quanh.

Abstract: This paper presents the phenomenon of time-dependent concrete deterioration. The investigation and assessment of this degradation are considered necessary and important for determining the structural load-bearing capacity and predicting the service life of structures. The quality of concrete

depends on time is influenced by various factors, including initial material quality, surrounding environmental conditions (temperature, humidity), the ingress of Cl^- ions and CO_2 , the carbonation process, and regional conditions. Due to these factors, the control and study of concrete quality degradation are regarded as complex tasks. Therefore, this issue has been given early attention by many researchers, and various models have been developed, such as the Linear Degradation Model, Corrosion-Induced Degradation Models, Probabilistic Degradation Models, Eurocode and FIB Model Code-based models, and Mechanistic-Based Models integrating mechanical, chemical, and environmental factors. Each of these models is characterized by its advantages, limitations, and specific scope and conditions of application. However, in order for any specific model to be applied under Vietnamese conditions for the purpose of concrete quality assessment, rigorous studies are required. This study aims to evaluate and propose a modified model suitable for specific conditions in Vietnam.

Keyword: Concrete, degradation, Corrosion, service life, Ambient conditions

1. Tổng quan nghiên cứu

Bê tông cốt thép là phổ biến trong xây dựng hiện đại nhờ vào khả năng chịu lực kết hợp giữa bê tông và thép; nó tồn tại bền vững với môi trường tự nhiên tốt hơn so với các vật liệu khác; thi công dễ dàng, giá thành hợp lý. Tuy nhiên, độ bền của kết cấu bê tông cốt thép chịu ảnh hưởng rất lớn bởi quá trình ăn mòn được bắt nguồn từ môi trường bên ngoài, đây là một hiện tượng phức tạp, từ sự xâm nhập của các tác nhân xâm thực như ion clorua, CO_2 , độ ẩm và oxy. Đây là một trong những nguyên nhân chính gây nên

suy giảm chất lượng bê tông cốt thép, đặc biệt công trình thuộc những vùng có môi trường khắc nghiệt như khu vực ven biển, vùng ô nhiễm công nghiệp, hay khí hậu nhiệt đới ẩm như tại Việt Nam. Điều kiện khí hậu biển Việt Nam mang tính chất nhiệt đới ẩm gió mùa, tương đối ổn định với nhiệt độ trung bình khoảng 23°C. Độ mặn của nước biển ở vùng ven biển Việt Nam thường dao động từ 20‰ đến 35‰ (phần nghìn), tùy thuộc vào vị trí và mùa. Ven biển có thể thấp hơn 20‰ do ảnh hưởng của nước ngọt từ sông, trong khi vùng biển khơi có thể cao hơn, dao động từ 32‰ đến 35‰.

Bê tông là vật liệu nhân tạo, nó được kết hợp giữa đá, cát và chất kết dính xi măng theo một tỷ lệ xác định. Điều này được hiểu là một phần chất lượng bê tông phụ thuộc vào chất kết dính. Nói cụ thể hơn là lực kết dính giữa đá, cát do xi măng tạo ra ảnh hưởng đến chất lượng bê tông. Chất lượng bê tông theo thời gian sẽ giảm do nhiều yếu tố, đặc biệt yếu tố môi trường có chứa các ion clorua, axit. Chính các ion này làm suy giảm lực liên kết bên trong bê tông, suy giảm chất lượng xi măng.

Cốt thép trong bê tông thường được bảo vệ bởi môi trường kiềm cao của bê tông (pH ~12.5–13.5), tạo thành một lớp màng thụ động trên bề mặt thép. Tuy nhiên, khi các tác nhân như ion clorua (từ nước biển, muối khử băng, môi trường ven biển) hoặc khí CO₂ (carbonat hóa) xâm nhập vào bê tông và phá vỡ lớp màng bảo vệ này, phản ứng oxy hóa – khử bắt đầu xảy ra. Kết quả là hình thành các sản phẩm ăn mòn có thể giãn nở gấp 2–6 lần thể tích thép ban đầu, gây nứt và bong tróc bê tông, từ đó thúc đẩy sự xâm nhập thêm của các tác nhân gây hại, tạo nên một chu trình ăn mòn tăng tốc.

Quá trình ăn mòn không chỉ làm suy giảm tiết diện của cốt thép chịu lực mà còn gây nứt dọc, giảm độ bám dính giữa bê tông và thép, dẫn đến giảm khả năng chịu tải, độ cứng và độ dẻo của kết cấu. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, chỉ cần mất khoảng 10% tiết diện cốt thép do ăn mòn có thể làm giảm tới 30–40% khả năng chịu uốn của dầm bê tông cốt thép [1]. Tình trạng này không chỉ ảnh hưởng đến tuổi thọ mà còn làm tăng chi phí bảo trì, sửa chữa và thậm chí gây mất an toàn trong khai thác công trình.

Nghiên cứu về hiện tượng suy giảm chất lượng Bê tông cốt thép xuất hiện khá sớm. Để kéo dài tuổi

thọ công trình, duy trì khả năng chịu lực kết cấu bê tông cốt thép, chính vì vậy đã có nhiều nghiên cứu, nhiều công trình nghiên cứu đã được thực hiện.

Martin Mottl và cộng sự đã nghiên cứu thực nghiệm đánh giá tác động của lớp phủ tinh thể lên bề mặt để tăng kết cấu khả năng chống xâm nhập Cl⁻ trong bê tông đã bị cacbonat hóa. Kết quả cho thấy khả năng giảm ion Cl⁻ lên đến 68% dưới bề mặt ngoài của công trình sau 180 ngày [1]. Giống như kết quả của nghiên cứu này thì các công trình nghiên cứu [2-9] cũng đã cho kết quả tương tự.

K Li, Y Zhang, S Wang, J Zeng với nghiên cứu: Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application [10]. K Li, Y Zhang đã phân tích ảnh hưởng của cacbonat hóa bề mặt lên tốc độ khuếch tán Cl⁻, áp dụng cả vào thiết kế công trình ven biển với tuổi thọ lên đến 150 năm. Nghiên cứu đã phân tích cơ chế cacbonat hóa làm tăng tốc độ khuếch tán Cl⁻, ảnh hưởng trực tiếp đến tuổi thọ công trình. Nghiên cứu đã kết hợp thí nghiệm, mô hình hóa và áp dụng cho thiết kế công trình thực tế, thích hợp cho nghiên cứu thiết kế công trình biển. Kết luận của nghiên cứu này đã cho có độ tin cậy cao vì có tính toán so sánh với dữ liệu thực tế, và tìm thấy ở một số nghiên cứu [9, 11-15]. Ở nghiên cứu này các giả định vẫn mang tính lý tưởng, chưa xét điều kiện vi khí hậu đặc thù.

Nghiên cứu “Effects of Carbonation and Chloride Ingress on the Durability of Concrete Structures” của R Folić và cộng sự đã tổng quan kết quả từ thử nghiệm thực địa và phòng thí nghiệm về ảnh hưởng của cacbonat hóa và xâm nhập Cl⁻ đến tuổi thọ công trình [11]. Bên cạnh đó một số nghiên cứu tương tự đã mô tả kèm mô hình thiết kế theo chuẩn Eurocode mới nhất.

Một nghiên cứu về “Effects of environment contaminated with chloride and sulfate on RC columns” của nhóm tác giả: Phan Đình Quốc và cộng sự đã khảo sát đánh giá thực tế chất lượng một số công trình bê tông cốt thép nhiễm Clorua ở Miền Trung, Việt Nam[16]. Kết quả đã cho thấy công trình đã bị nhiễm Clorua, bị suy giảm chất lượng. Nhận xét này cũng tương tự như nhiều công trình nghiên cứu [2-5, 9, 14, 17-20].



a) Khảo sát bằng súng bột nảy b) Khảo sát bằng máy dò thép c) Khảo sát bằng máy siêu âm
Hình 1. Một số hình ảnh về khảo sát công trình BTCT được lấy nghiên cứu [16]

Nhóm nghiên cứu [16] đã thực hiện khảo sát cường độ bê tông của 5 công trình Bê tông cốt thép trên địa bàn Thành phố Vinh (cũ) và huyện Nghi Lộc (cũ), Nghệ An, cách biển khoảng 10km (Hình 1). Kết quả khảo sát thể hiện ở Bảng 3 - Kết quả cường độ bê tông của 5 công trình BTCT tại khu vực vùng trung du (thành phố Vinh, Nghi Lộc). Nghiên cứu này đã nói về sự suy giảm khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép khi cốt thép bị ăn mòn trong môi trường ô nhiễm clorua và sunfat tại các vùng ven biển Việt Nam, cụ thể cho thấy: sự suy giảm chất lượng cột bê tông cốt thép khi cốt thép bị ăn mòn phụ thuộc vào các vị trí khác nhau dọc theo cùng một cấu kiện kết cấu theo phương thẳng đứng (khoảng cách và vị trí so với mực nước tiếp xúc). Hơn nữa, một số đề xuất trước đây về dự báo sự suy giảm chất lượng công trình (RC) theo thời gian khi cốt thép bị ăn mòn chỉ gần đúng với các mặt cắt ở các khu vực ít tiếp xúc với nước biển (Vùng II). Đối với các khu vực thường xuyên ngập trong nước (Vùng I) và các khu vực không tiếp xúc với nước tại đỉnh cột (Vùng III), kết quả cho thấy sự khác biệt rõ ràng.

2. Các mô hình về suy giảm chất lượng bê tông

Nhiều mô hình đã được đề xuất để dự báo sự suy giảm chất lượng bê tông, bê tông cốt thép. Các mô hình được kể đến là: Mô hình tuyến tính (Linear degradation model); Mô hình logarit hoặc phi tuyến; Mô hình Tuutti; Mô hình dựa trên xác suất; Mô hình theo chuẩn Eurocode & FIB Model Code; Mô hình cơ học – hóa học – môi trường tích hợp; Alonso et al; Vu và Stewart,... Mỗi một mô hình có ưu điểm, nhược điểm riêng, điều này thể hiện phạm vi ứng dụng khác nhau theo điều kiện cụ thể.

2.1 Mô hình tuyến tính (Linear degradation mode)

Mô hình tuyến tính được phát triển từ các nghiên cứu của Bazant & Panula, năm 1979 [4]. Mô hình này với giả thiết rằng cường độ hoặc độ bền bê tông giảm dần theo thời gian một cách tuyến tính.

Biểu thức:

$$D(t)=D_0-at \tag{1}$$

trong đó:

- D(t) là chất lượng/cường độ tại thời điểm t;
- D₀ là chất lượng ban đầu;
- α là tốc độ suy giảm theo thời gian, [MPa/năm].

2.2 Mô hình logarit hoặc phi tuyến

Mô hình phi tuyến thường sử dụng để phản ánh tốc độ suy giảm chậm dần theo thời gian. Mô hình này thường được ứng dụng dự đoán suy giảm cường độ chịu nén bê tông trong các kết cấu thường xuyên bị khô – ẩm luân phiên.

Mô hình phi tuyến có 2 dạng[4, 21]:

◆ Dạng 1: Mô hình mũ (Exponential)

$$D(t)=D_0 \cdot e^{-\beta t} \tag{2}$$

Phù hợp với trường hợp suy giảm nhanh ban đầu rồi chậm dần (như bê tông bị rỗ mặt ban đầu).

◆ Dạng 2: Logarit

$$D(t)=D_0 -\alpha \ln(t+1) \tag{3}$$

Phản ánh sự ổn định dần theo thời gian, chẳng hạn quá trình khô co sau khi bê tông đóng rắn.

2.3 Mô hình Tuutti

Xuất phát từ nghiên cứu kinh điển của Tuutti (1982) [1, 14, 18] về ăn mòn cốt thép. Mô hình này

được sử dụng rộng rãi trong các công cụ dự báo tuổi thọ như Life-365.

Mô hình này chia suy giảm thành 2 giai đoạn:

- Giai đoạn khởi phát (initiation): ion Cl^- thâm nhập đến cốt thép;
- Giai đoạn lan truyền (propagation): ăn mòn làm bê tông nứt và suy giảm.

Mô hình Tuutti được dùng để mô tả tuổi thọ kết cấu bê tông trong môi trường biển.

2.4 Mô hình dựa trên xác suất [17, 22, 23]

Các mô hình dự báo suy giảm theo cách đã xác định thì thường chỉ cho 1 giá trị duy nhất, chẳng hạn: hệ số khuếch tán Cl^- , hàm suy giảm $f_p(t)$. Tuy nhiên thực tế các tham số này dao động rất lớn do yếu tố vật liệu, môi trường, quy trình thi công...

Chính vì vậy dẫn đến nhiều nhà nghiên cứu từ thập niên 1960–1980 đã bắt đầu dùng mô hình xác suất để tính toán suy giảm với phân bố xác suất, thay vì chỉ 1 giá trị. Tiên phong trong ý tưởng này là T. F. Fwa (1980), sau đó được mở rộng bởi M. DuraCrete Project (1996–2001, EU). Điều này nhằm phát triển mô hình xác suất cho khuếch tán Cl^- trong tiêu chuẩn FIB Model Code.

Chẳng hạn một hàm khuếch tán Cl^- dựa trên xác suất là:

$$C(x, t) = C_s(1 - e_{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_{eff}t}})) \quad (4)$$

trong đó:

- C_s là nồng độ Cl^- bề mặt (biến ngẫu nhiên);
- D_{eff} là hệ số khuếch tán hiệu dụng (biến ngẫu nhiên);
- x là độ sâu;
- t là thời gian;
- e_{erf} là hàm sai số.

Các tham số D_{eff} , C_s độ dày lớp bảo vệ, độ rỗng bê tông... được gán theo phân bố xác suất (thường là dạng Normal, Log-normal).

2.5 Mô hình theo chuẩn Eurocode & FIB – Carbonation [11, 12, 18, 19, 24]

Mô hình này mô tả sự xâm nhập CO_2 , ảnh hưởng đến lớp bảo vệ cốt thép.

Biểu thức:

$$x(t) = k \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

trong đó:

- $x(t)$ là độ sâu carbon hóa tại thời điểm t ;

k là hằng số phụ thuộc môi trường, chất lượng bê tông.

Khi $x(t) \geq$ chiều dày lớp bảo vệ cốt thép thì cốt thép sẽ bắt đầu bị ăn mòn.

2.6 Mô hình Empirical Strength Decay [2, 5, 6, 25]

Mô hình Empirical Strength Decay đã được hình thành từ các nghiên cứu thực nghiệm và được tổng hợp từ những năm 1960–1980 khi các nhà nghiên cứu bắt đầu quan tâm đến hiện tượng bê tông giảm chất lượng trong điều kiện môi trường khắc nghiệt. Dạng công thức thực nghiệm phổ biến như mô hình suy giảm cường độ theo thời gian dựa trên quan sát thực tế từ các công trình bê tông lâu năm. Mô hình được ứng dụng rộng rãi trong các hướng dẫn về công tác bảo trì, kiểm định kết cấu, chẳng hạn như ACI 201.2R, fib Model Code for Service Life Design (Bulletin 34, 2006) hay các nghiên cứu của Bazant & Panula (1979) về dự đoán độ bền. Mô hình này thường được dùng để dự báo về tính nhanh mức suy giảm cường độ bê tông do tác động của cacbonat hóa, ăn mòn cốt thép, hoặc môi trường xâm thực, phục vụ tính toán gia cố, kiểm định và dự báo tuổi thọ còn lại của công trình. Tuy đây không phải là mô hình lý thuyết hoàn chỉnh, nhưng nó được coi là một công cụ thực tiễn hữu ích, đặc biệt trong giai đoạn khảo sát hiện trạng và lập kế hoạch kiểm định, duy tu, sửa chữa các kết cấu bê tông cốt thép lâu năm.

Đây là một mô hình thực nghiệm với biểu thức là:

$$f_c(t) = f_{c28} \cdot (1 - \alpha \cdot \log(1 + \frac{t}{t_0})) \quad (6)$$

trong đó:

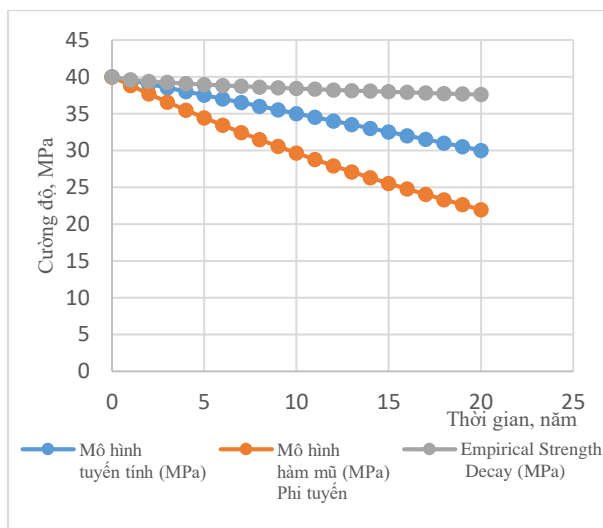
- $f_c(t)$ là cường độ bê tông tại thời điểm t (năm);
- f_{c28} là cường độ nén tại 28 ngày;
- α là hệ số suy giảm (phụ thuộc môi trường và loại bê tông);
- t_0 là mốc thời gian bắt đầu suy giảm (thường là 1 năm).

3. Đánh giá mô hình suy giảm chất lượng bê tông

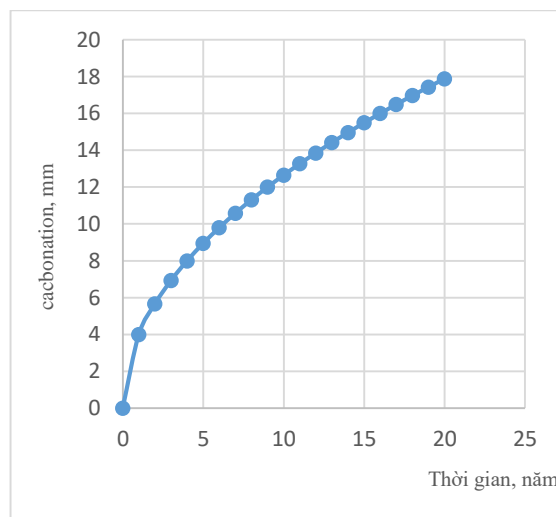
Theo [16], kết quả khảo sát được đối với 5 công trình bê tông cốt thép ven biển, cách biển trong vòng 10km, tại khu vực thành phố Vinh (cũ), huyện Nghi Lộc (cũ) của tỉnh Nghệ An, tiến hành đánh giá mô hình về suy giảm chất lượng công trình bê tông cốt thép (Bảng 1).

Bảng 1. Số liệu cường độ bê tông khảo sát được của 5 công trình BTCT

Thời gian (năm)	Mô hình tuyến tính (MPa)	Mô hình hàm mũ (MPa)	FIB Model Code – Carbonation (mm)	Empirical Strength Decay (MPa)
0	40	40	0	40.00
1	39.50	38.82	4.00	39.60
2	39.00	37.67	5.66	39.39
3	38.50	36.56	6.93	39.23
4	38.00	35.48	8.00	39.08
5	37.50	34.43	8.94	38.95
6	37.00	33.41	9.80	38.83
7	36.50	32.42	10.58	38.71
8	36.00	31.47	11.31	38.61
9	35.50	30.54	12.00	38.51
10	35.00	29.63	12.65	38.41
11	34.50	28.76	13.27	38.31
12	34.00	27.91	13.86	38.22
13	33.50	27.08	14.42	38.14
14	33.00	26.28	14.97	38.05
15	32.50	25.51	15.49	37.97
16	32.00	24.75	16.00	37.89
17	31.50	24.02	16.49	37.81
18	31.00	23.31	16.97	37.73
19	30.50	22.62	17.44	37.66
20	30.00	21.95	17.89	37.59



a) Biểu đồ suy giảm cường độ bê tông



b) Biểu đồ suy giảm tính cacbonat bê tông (mm), mô hình cacbonat

Hình 2. Biểu đồ thể hiện sự suy giảm chất lượng bê tông

Hình 2 là hình ảnh về sự suy giảm chất lượng bê tông bằng các mô hình khác nhau. Hình 2a thể hiện suy giảm về cường độ theo thời gian, Hình 2b thể hiện suy giảm thông qua mức độ về độ dày bê tông bị cacbonation theo thời gian. Hai yếu tố là cường độ và mức độ cacbonation đều cho thấy

chất lượng bê tông bị suy giảm theo thời gian. Trên Hình 2 (a,b), mỗi một mô hình đã thể hiện tốc độ suy giảm, độ nhanh, chậm tại các giai đoạn khác nhau tùy thuộc mô hình.

Qua kết quả và biểu đồ trên đây ta có thể nhận xét các mô hình trên như sau (Bảng 2):

Bảng 2. Đánh giá so sánh các mô hình suy giảm BTCT do ăn mòn

Mô hình	Đặc điểm chính	Tốc độ suy giảm
Tuyến tính	Đều đặn theo thời gian	Ổn định
Hàm mũ	Nhanh lúc đầu, chậm dần	Cao ban đầu
Empirical	Chậm lúc đầu, tăng dần	Tăng dần
Mô hình carbonation (FIB code)	Ban đầu tăng nhanh, chậm dần về sau	Cao ban đầu

4. Khảo sát, đánh giá thực trạng công trình BTCT

Thực hiện đánh giá các mô hình ăn mòn kết cấu Bê tông cốt thép dựa trên một khảo sát đã được thực hiện ở thực tế với 5 cột BTCT, tương ứng với 5 công trình khác nhau ở ven biển Miền trung Việt Nam [16]. Mức độ suy giảm về cường độ đã khảo sát được là

ngghiêm trọng. Đây là điều phản ánh phản ứng thực tế cho nhiều công trình tương tự.

Trích dẫn kết quả cường độ bê tông (Bảng 3) khảo sát được đối với 5 công trình bê tông cốt thép lấy từ nghiên cứu [16]. Kết quả cường độ có được từ việc khảo sát bằng phương pháp sử dụng Súng bặt nẩy và thiết bị Siêu âm bê tông.

Bảng 3. Kết quả cường độ bê tông của 5 công trình BTCT tại khu vực vùng trung du (thành phố Vinh, Nghi Lộc)

TT	Thiết kế	Cột 1			Cột 2			Cột 3			Cột 4			Cột 5		
A _i	-	Vùng III	Vùng II	Vùng I	Vùng III	Vùng II	Vùng I	Vùng III	Vùng II	Vùng I	Vùng III	Vùng II	Vùng I	Vùng III	Vùng II	Vùng I
f _y	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f' _c	35	32.0	28.8	26.4	30.1	27.8	25.0	30.0	27.1	24.3	31.7	28.8	24.9	31.8	27.5	25.8
c	30	28	24	20	28	27	24	28	27	23	28	26	22	27	27	22
d	20	20	19	18	19.8	19.7	18.6	20	19.2	18.3	19.9	19.5	18.6	19.6	19.7	18.4
A _b	300	296	288	280	296	294	288	296	294	286	296	292	284	294	294	284
TT	Thiết kế	Cột 1			Cột 2			Cột 3			Cột 4			Cột 5		
A _i	-	Vùng III	Vùng II	Vùng I	Vùng III	Vùng II	Vùng I	Vùng III	Vùng II	Vùng I	Vùng III	Vùng II	Vùng I	Vùng III	Vùng II	Vùng I
f _y	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f' _c	35	30.2	27.9	25.8	30.2	28.5	25.7	29.7	28.0	24.8	30.9	28.6	25.0	31.7	27.4	24.8
c	30	28	26	22	28	26	23	27	27	23	29	26	24	28	25	24
d	20	19.6	18.7	18.3	19.8	18.8	18.3	19.7	19	18.4	19.7	19.4	18.2	19.7	19.4	18.4
A _c	300	296	292	284	296	292	286	294	294	286	298	292	288	296	290	288

Chú thích: A_i là tiết diện khảo sát; f_y (MPa) là cường độ chịu kéo của thép; f'_c (MPa) là cường độ chịu nén của bê tông; c (mm) là chiều dày lớp bảo vệ; d (mm) là đường kính cốt thép; A_c (mm²) là diện

tích tiết diện khảo sát. Vùng I – vùng ngập nước; vùng II – vùng sóng đánh; vùng III – khô.

Dựa vào kết quả bảng 1, áp dụng các mô hình tuyến tính, hàm mũ đánh giá các hệ số ăn mòn (Bảng 4).

Bảng 4. Hệ số ăn mòn α, β của mô hình tuyến tính, hàm mũ

Cấu kiện Cột	Cường độ (nén), 20 năm MPa	Cường độ ban đầu (MPa)	α Tuyến tính	β Hàm mũ	
Cột 1	26.4	35.0	0.43	1.326	0.014
Cột 2	25.0		0.50	1.400	0.017
Cột 3	24.3	30.0	0.29	1.235	0.011
Cột 4	24.9		0.26	1.205	0.009
Cột 5	25.8	35.0	0.46	1.357	0.015

Cấu kiện Cột	Cường độ (nén), 20 năm MPa	Cường độ ban đầu (MPa)	α Tuyến tính	β Hàm mũ	
Cột 6	25.8	32.0	0.46	1.357	0.015
Cột 7	25.7		0.32	1.245	0.011
Cột 8	24.8		0.36	1.290	0.013
Cột 9	25.0	32.0	0.35	1.280	0.012
Cột 10	24.8		0.36	1.290	0.013

Theo Bảng 4, tính được giá trị trung bình các hệ số ăn mòn: $\alpha = 0.38$, $\beta = 0.13$. Từ giá trị này, dựa vào khuyến cáo và cung cấp số liệu của tiêu chuẩn FIB Model Code 2010, EN 206:2013 với các giá trị này thì sẽ phù hợp tương ứng với những công trình vùng trung du, ẩm ướt, môi trường có tính ổn định. Nhận định này cũng phù hợp với nhận xét của một số nghiên cứu [6, 10-12, 14, 20-22, 26-31].

5. Kết luận

Việt Nam có điều kiện khí hậu khá đa dạng: vùng đồng bằng, trung du, vùng ven biển, vùng nhà máy, các khu công nghiệp sản xuất hóa chất, điều này ảnh hưởng nhiều đến kinh tế xã hội [16, 32-34]. Điều này dẫn tới mỗi vùng khác nhau thì có đặc điểm ăn mòn công trình xây dựng sẽ khác nhau.

- Mô hình tuyến tính đơn giản, dễ dùng, thuận tiện trong đánh giá sơ bộ (Bảng 1, Hình 2). Trong môi trường có sự biến động lớn, tính chất ăn mòn thay đổi, mô hình tuyến tính cho kết quả với độ chính xác chưa cao;

- Mô hình phi tuyến phản ánh tính phù hợp đối với môi trường ăn mòn có tính thay đổi, dễ dùng, có độ chính xác tốt (Bảng 1, 4 và Hình 2);

- Mô hình carbonation (FIB code), Empirical khó dùng và phức tạp hơn, phụ thuộc nhiều vào số liệu khảo sát thực địa về chất lượng công trình có tuổi đời lớn. Số lượng khảo sát càng lớn, với tuổi thọ công trình đủ lớn thì sẽ cho độ chính xác cao.

Lời cảm ơn:

Bài báo này được Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam hỗ trợ theo đề tài mã số B2024-TDV-06.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. Mottl, J. Pazderka, and P. J. C. Reiterman (2025), "Crystalline Coating and Its Influence on Chloride Ion Diffusion Resistance of Carbonated Concrete", MPDI vol. 15, no. 2, p. 163.
 [2] M. Ali et al. (2024), "A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in

situ investigation", RSC Adv, vol. 14, no. 50, pp. 37252-37271, Nov 19.

[3] U. M. Angst et al.(2024), "Chloride-induced corrosion of steel in concrete-insights from bimodal neutron and X-ray microtomography combined with ex-situ microscopy", Mater Struct, vol. 57, no. 4, p. 56.
 [4] Z. Bažant and L. J. M. e. C. Panula (1978), "Practical prediction of time-dependent deformations of concrete: Part II: Basic creep", vol. 11, no. 5, pp. 317-328.
 [5] L. Casanova et al.(2023), "Recent Advances in the Use of Green Corrosion Inhibitors to Prevent Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete", Materials (Basel), vol. 16, no. 23, Nov 30.
 [6] R. R. Hussain, A. Alhozaimy, A. Al-Negheimish, D. D. N. Singh, and M. Ahmed (2024), "Synergistic protection of borate and silicate salts composite for controlling the chloride-induced pitting and uniform corrosion of steel reinforcement bars embedded in mortars", Sci Rep, vol. 14, no. 1, p. 7069, Mar 25.
 [7] E. Menendez, C. Argiz, and M. A. Sanjuan (2019), "Chloride Induced Reinforcement Corrosion in Mortars Containing Coal Bottom Ash and Coal Fly Ash", Materials (Basel), vol. 12, no. 12, Jun 15.
 [8] J. A. Mukhti, K. P. V. Robles, K. H. Lee, and S. H. Kee (2023), "Evaluation of Early Concrete Damage Caused by Chloride-Induced Steel Corrosion Using a Deep Learning Approach Based on RNN for Ultrasonic Pulse Waves", Materials (Basel), vol. 16, no. 9, May 1.
 [9] L. Skarzynski, K. Kibort, and A. Malachowska (2021), "3D X-ray Micro-CT Analysis of Rebar Corrosion in Reinforced Concrete Subjected to a Chloride-Induced Environment", Molecules, vol. 27, no. 1, Dec 29.
 [10] K. Li, Y. Zhang, S. Wang, J. J. M. Zeng (2018), "Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application", Materials and Structures. vol. 51, no. 6, p. 164.
 [11] R. Folić, D. Zenuović, and Z. J. J. o. t. S. C. S. Bruić (2024), "Effects of carbonation and chloride ingress on the durability of concrete structures", Journal of the Serbian Chemical Society. vol. 89, no. 5, pp. 729-742.

- [12] K. Ichimiya, R. Yamamoto, K. Ikeda, Q. D. Nguyen, and A. Castel (2024), "A New Performance-Based Test for Assessing Chloride-Induced Reinforcement Corrosion Resistance of Geopolymer Mortars", *Materials* (Basel), vol. 17, no. 21, Oct 23.
- [13] I. Stipanovic Oslakovic, D. Bjegovic, D. J. M. Mikulic (2010), "Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment", *Materials and Structures* .vol. 43, no. 10, pp. 1397-1412.
- [14] H. Tang, J. Sun, D. Su, Y. Huang, and P. Wu (2021), "Coumarin as a green inhibitor of chloride-induced aluminum corrosion: theoretical calculation and experimental exploration", *RSC Adv*, vol. 11, no. 40, pp. 24926-24937, Jul 13.
- [15] M. Valcuende, R. Calabuig, A. Martinez-Ibernon, and J. Soto (2020), "Influence of Hydrated Lime on the Chloride-Induced Reinforcement Corrosion in Eco-Efficient Concretes Made with High-Volume Fly Ash", *Materials* (Basel), vol. 13, no. 22, Nov 14.
- [16] D.-Q. Phan, V.-P. Phan, N.-L. J. A. Tran (2025), "Effects of environments contaminated with chlorides and sulfates on rc columns", *Architecture and Engineering*.vol. 10, no. 1, pp. 59-69.
- [17] U. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, Ø. J. C. Vennesland (2009), "Critical chloride content in reinforced concrete—A review", *Cement and Concrete Research*. vol. 39, no. 12, pp. 1122-1138.
- [18] A. Committee (2001), "Guide to durable concrete", American Concrete Institute.
- [19] N. Concha and A. Oreta (2018), "A model for time-to-cracking of concrete due to chloride induced corrosion using artificial neural network", in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 431, no. 7, p. 072009: IOP Publishing.
- [20] E. Ertekin, J. K. Hatt, K. T. Konstantinidis, and U. Tezel (2016), "Similar Microbial Consortia and Genes Are Involved in the Biodegradation of Benzalkonium Chlorides in Different Environments", *Environ Sci Technol*, vol. 50, no. 8, pp. 4304-13, Apr 19.
- [21] Soutsos, Marios, ed (2010). *Concrete durability: a practical guide to the design of durable concrete structures*. Thomas Telford Ltd.
- [22] Lindvall, Anders (1998). "Duracrete—probabilistic performance based durability design of concrete structures". In 2nd Int. PhD. Symposium in civil engineering.
- [23] E. Messina et al.(2021), "Synergistic Inhibition Effect of Chitosan and L-Cysteine for the Protection of Copper-Based Alloys against Atmospheric Chloride-Induced Indoor Corrosion", *Int J Mol Sci*, vol. 22, no. 19, Sep 25.
- [24] Z. Bažant and L. J. M. e. C. Panula (1979), "Practical prediction of time-dependent deformations of concrete", *Materials and Structures* .vol. 12, no. 3, pp. 169-174.
- [25] M. Alexander, H. J. C. Beushausen (2019), "Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures—review and critique", *Cement and Concrete Research* .vol. 122, pp. 17-29.
- [26] B. Fu and D.-C. J. J. o. B. E. Feng (2021), "A machine learning-based time-dependent shear strength model for corroded reinforced concrete beams", *Journal of Building Engineering*. vol. 36, p. 102118.
- [27] W. Gao, X. Chen, and D. Chen (2019), "Genetic programming approach for predicting service life of tunnel structures subject to chloride-induced corrosion", *J Adv Res*, vol. 20, pp. 141-152, Nov.
- [28] H. Ji and H. Ye (2024), "Dataset on carbonation and chloride-induced steel corrosion in cementitious mortars", *Data Brief*, vol. 55, p. 110595, Aug.
- [29] H. J. P. o. t. I. o. C. E. Kew (2010), "Concrete durability—a practical guide to the design of durable concrete structures", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* .vol. 163, no. 1, p. 16.
- [30] G. Lin, Y. Liu, Z. J. C. Xiang (2010), "Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments", *Cement and concrete composites*. vol. 32, no. 8, pp. 571-579.
- [31] X. Liu, W. Zhang, P. Sun, and M. Liu (2022), "Time-Dependent Seismic Fragility of Typical Concrete Girder Bridges under Chloride-Induced Corrosion", *Materials* (Basel), vol. 15, no. 14, Jul 19.
- [32] V. T. Phan, Đ. T. J. V. J. o. S. E. Ngô (2013), "Biến đổi khí hậu ở Việt Nam: Một số kết quả nghiên cứu, thách thức và cơ hội trong hội nhập quốc tế", *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, vol. 29, no. 2.
- [33] N. V. Thắng, nnk (2010), "Biến đổi khí hậu và tác động ở Việt Nam", *Viện Khoa học và Khí tượng Việt Nam*.
- [34] N. V. Thanh (2024), "Tác động biến đổi khí hậu đến sự phát triển bền vững của Việt Nam", *Tạp chí Khoa học xã hội Việt Nam*, số 4.