

ỨNG DỤNG LÝ THUYẾT MẠNG XÁC SUẤT BAYER ĐỂ DỰ BÁO SỰ BỀN VỮNG CỦA KẾT CẤU BÊ TÔNG CỐT THÉP CHỊU SỰ TẤN CÔNG CỦA KHÍ CO₂

Vũ Ngọc Tru¹

Tóm tắt: Quá trình khảo sát thực nghiệm dựa trên thí nghiệm cacbonat hóa bê tông và thông qua chiều sâu cacbonat thu được, việc cập nhật sự phân phối của các biến có liên quan trong mô hình bài toán cacbonat được thực hiện nhờ vào sơ đồ mạng lưới Bayer. Việc cập nhật được thực hiện tại các thời điểm 5 ngày, 7 ngày và 10 ngày kể từ ngày bắt đầu thí nghiệm cacbonat hóa. Sự cập nhật các hàm phân phối sau đó được sử dụng trong hai mục đích: một mặt, dự kiến thời gian đặt trong buồng khí cacbonic tương ứng với một xác suất nhất định cho lớp bê tông bảo vệ sẽ bị cacbonat, mặt khác tiếp cận về mặt xác suất để tính toán.

Từ khóa: Cacbonat hóa bê tông, ăn mòn cốt thép, mạng Bayer.

Summary: From an experimental investigation on accelerated carbonation tests and the obtained carbonated depths, the updating of the distributions of variables involved in the carbonation model is undertaken thanks a Bayesian network. Several updates are performed at 5 days, 7 days and 10 days of exposure. The updated distributions are then used in a twofold purpose: on the one hand, the time of exposure in the carbonation chamber is stated with a given probability for the experimental cover to be carbonated, on the other hand a probabilistic approach to the durability design is carried out.

Keywords: Carbonation of concrete, corrosion, bayesian network.

Nhận ngày 13/08/2012, chỉnh sửa ngày 08/11/2012, chấp nhận đăng ngày 15/12/2012

1. Đặt vấn đề

Kết cấu bê tông cốt thép có xu hướng bị phá hủy theo thời gian. Trong số những nguyên nhân gây ra sự suy giảm chất lượng của bê tông cốt thép, hiện tượng cacbonat hóa bê tông được nhắc đến nhiều nhất bởi vì đa phần các công trình bê tông cốt thép đều tiếp xúc trực tiếp với không khí trong bầu khí quyển. Khi đó một số thành phần hóa học có mặt trong xi măng tác dụng với khí CO₂ để tạo ra đá vôi CaCO₃ (quá trình cacbonat hóa bê tông). Quá trình cacbonat hóa bê tông dẫn đến sự sụt giảm độ pH của dung dịch nước lỗ rỗng trong bê tông xuống khoảng 8, do đó làm mất khả năng bảo vệ chống ăn mòn cho các thanh cốt thép trong bê tông. Từ trạng thái ăn mòn bị động với tốc độ cực nhỏ trong môi trường pH=13 (bê tông chưa bị cacbonat hóa), thanh cốt thép bị chuyển sang trạng thái ăn mòn chủ động với tốc độ cao khi pH<10. Lớp gỉ thép có thể tích tăng lên đến 7 lần so với thép nguyên chất dẫn đến làm vỡ bung lớp bê tông bảo vệ. Quá trình ăn mòn diễn ra gây giảm tiết diện làm việc của cốt thép, gây mất liên kết giữa cốt thép với bê tông và dẫn đến hậu quả làm giảm thời hạn phục vụ của công trình.

¹TS, Khoa Xây dựng Cầu đường. Trường Đại học Xây dựng. E-mail: vungoctrudhxd@gmail.com

Để không chế thời điểm bắt đầu của quá trình ăn mòn do hiện tượng cacbonat hóa bê tông, một số chỉ dẫn về độ bền vững đã được đề cập trong các tiêu chuẩn thiết kế của châu Âu. Ở thời điểm hiện tại, tiêu chuẩn Eurocode 2 [Eurocode, 2007] đã có các quy định về chiều dày bê tông bảo vệ tối thiểu, phụ thuộc vào cường độ bê tông và điều kiện môi trường mà kết cấu bê tông sẽ tiếp xúc. Trên một hướng khác, một số yêu cầu cụ thể về chỉ số bền vững công trình ví dụ như hệ số khuếch tán của vật liệu bê tông đã được bổ sung [7].

Thí nghiệm cacbonat hóa tăng tốc được sử dụng để đánh giá hệ số khuếch tán khí CO_2 trong bê tông bởi vì chúng ta khó có thể đo trực tiếp tham số này trong điều kiện bình thường. Thông qua một model tính toán về cacbonat hóa bê tông, hệ số khuếch tán được ước định bởi sự so sánh giữa kết quả đo và giá trị tính toán lý thuyết về chiều sâu cacbonat hóa trên các mẫu. Một điểm khác cần đánh giá là khả năng áp dụng của model tính toán trong trường hợp khí CO_2 có áp suất riêng lớn trong suốt thời gian thí nghiệm. Trên thực tế điều kiện áp suất cao sẽ điều chỉnh hiện tượng cacbonat hóa theo xu hướng làm tăng số lượng của các hydrat hoạt tính trong bê tông. Nhìn chung, trong khuôn khổ bài toán dự đoán về sự bền vững của kết cấu bê tông dựa trên sự khởi động ăn mòn cốt thép, kết quả của thí nghiệm cacbonat tăng tốc có thể sử dụng để ước định xác suất về thời gian cần thiết để kích hoạt hiện tượng ăn mòn của cốt thép. Đây là tham số quan trọng được sử dụng trong thiết kế công trình cũng như trong các chiến lược bảo trì công trình [10; 11].

Trong nghiên cứu này, một cuộc khảo sát chi tiết về quá trình cacbonat hóa bê tông đã được thực hiện tại phòng thí nghiệm về vật liệu và độ bền vững công trình - Viện Khoa học ứng dụng quốc gia Pháp tại Toulouse (INSA Toulouse). Các mẫu bê tông chế tạo từ xi măng CEM I, được đặt trong điều kiện môi trường XC1 (luôn khô, ẩm dài hạn). Chiều sâu cacbonat hóa trong thí nghiệm tăng tốc được đo sau một vài thời điểm và được so sánh với kết quả tính toán lý thuyết có xét đến các điều kiện đầu vào tương tự. Sự so sánh này được thực hiện có sử dụng mạng xác suất Bayes để điều chỉnh hàm phân phối của hệ số khuếch tán khí CO_2 và các đặc trưng khác của bê tông cũng như thời gian cần thiết để khởi động ăn mòn. Khi kể đến xác suất xuất hiện của tham số thời gian này đồng thời tuân theo chỉ dẫn của một số tiêu chuẩn thiết kế hiện hành, chúng ta có thể đề xuất chiều dày lớp bê tông bảo vệ phù hợp với các tiêu chuẩn về độ bền vững của công trình.

2. Khảo sát thực nghiệm

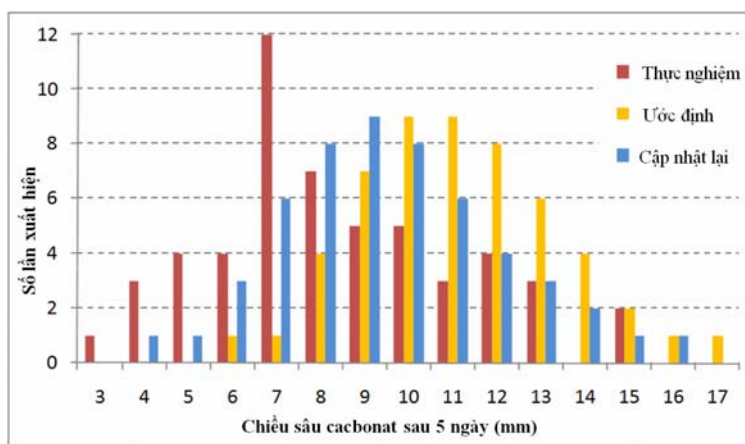
Mục đích chung của việc khảo sát thực nghiệm là xác định các đặc trưng dẫn đến sự khởi đầu của quá trình ăn mòn tự nhiên của cốt thép đặt trong bê tông. Các kết quả thực nghiệm trong các nghiên cứu trước đây đã chứng tỏ rằng cốt thép bắt đầu bị ăn mòn khi lớp bê tông bảo vệ cốt thép chưa bị cacbonat hoàn toàn [8]. Nhằm làm rõ hơn các nhận định này, hai trạng thái cacbonat hóa lớp vỏ bê tông bao bọc được lựa chọn bao gồm: cacbonat hóa hoàn toàn (với xác suất cacbonat hóa hoàn toàn lớp bê tông bảo vệ lớn hơn 95%) và cacbonat hóa một phần (với xác suất cacbonat hóa hoàn toàn lớp bê tông bảo vệ xấp xỉ 50%). Bên cạnh đó, một model cacbonat hóa được sử dụng trong không gian xác suất với hai mục đích: hỗ trợ việc tính toán độ bền vững của kết cấu bê tông như đã nói đến ở phần trước và xác định thời gian ngâm mẫu trong buồng khí CO_2 để đạt được chiều sâu cacbonat hóa của bê tông với xác suất dự kiến.

Cấp phối bê tông chứa xi măng CEM I 52.5R (phân loại theo tiêu chuẩn Pháp) đã được sử dụng trong quá trình thí nghiệm. Tỷ lệ cấp phối trong bê tông phù hợp với các khuyến nghị tối thiểu đối với lớp XC1 - tiêu chuẩn châu Âu [5].

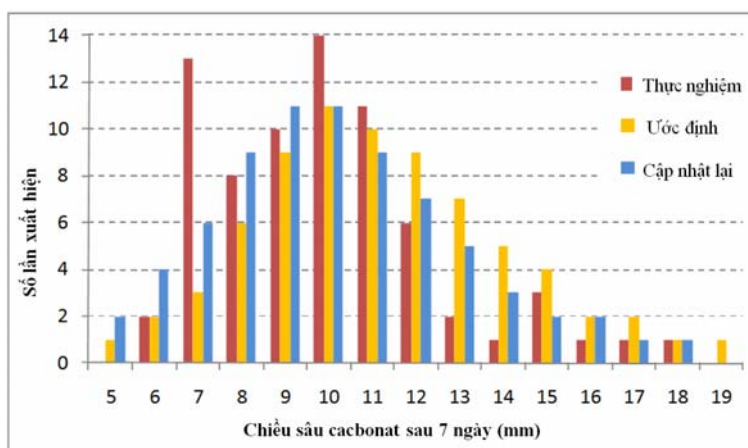
Bảng 1. Thành phần cấp phối bê tông (Xi măng CEM I 52.5 R)

Thành phần	Đơn vị	Khối lượng
Xi măng	kg/m ³	295
Cát	kg/m ³	989
Sỏi	kg/m ³	792
Nước	kg/m ³	200

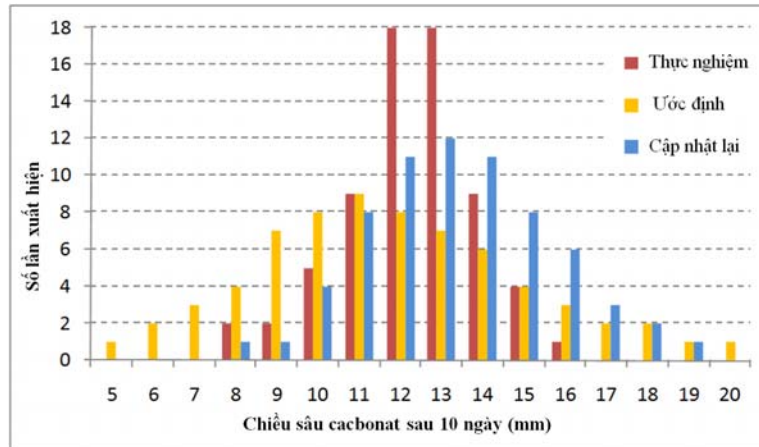
Các mẫu bê tông được bảo dưỡng ẩm 7 ngày sau khi đổ mẫu, sau đó được đặt trong môi trường có độ ẩm và nhiệt độ khống chế trong 1 tháng để đạt được trạng thái tối ưu cho quá trình cacbonat hóa trước khi đưa vào buồng chứa mẫu có nồng độ CO₂ lớn (áp suất riêng phần CO₂ đạt 50% áp suất khí quyển). Trong buồng chứa mẫu, độ ẩm tương đối được khống chế là 65% và nhiệt độ là 20°C. Chiều sâu lớp bê tông bị cacbonat được đo bởi phenolphthalein ở các thời điểm 5 ngày, 7 ngày và 10 ngày kể từ khi đặt mẫu trong buồng chứa. Kết quả đo được giới thiệu trong các hình vẽ từ 1 đến 3.



Hình 1. Chiều sâu cacbonat ở thời điểm 5 ngày



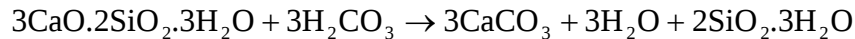
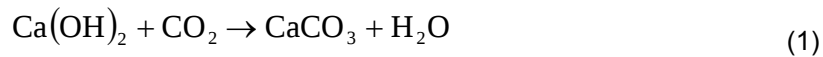
Hình 2. Chiều sâu cacbonat ở thời điểm 7 ngày



Hình 3. Chiều sâu cacbonat ở thời điểm 10 ngày

3. Model tính toán tốc độ cacbonat hóa bê tông

Khí CO_2 thấm qua hệ thống lỗ rỗng không bão hòa trong bê tông, tồn tại dưới dạng hòa tan trong dung dịch nước lỗ rỗng và phản ứng với thành phần hydrat (chủ yếu là portlandit và C-S-H) dựa theo các phương trình cân bằng hóa học dưới đây:



Quá trình khuếch tán khí CO_2 và cacbonat hóa tuân theo những quan hệ phi tuyến và có tốc độ giảm dần theo thời gian.

Các model tính toán về quá trình cacbonat hóa đều giả định rằng quá trình tiêu thụ khí CO_2 đều diễn ra phía trước ranh giới vùng cacbonat và chiều sâu cacbonat trong bê tông có quan hệ tỷ lệ thuận với căn bậc hai của thời gian của quá trình cacbonat [4,14]. Những model này cần cung cấp đầu vào sức bền kháng cacbonat tự nhiên, xác định theo chỉ số (C0/D0) với C0 là tổng lượng có thể cacbonat hóa trong bê tông và D0 là hệ số khuếch tán khí CO_2 . Một hệ số thực nghiệm được sử dụng cho model này sẽ được ước định theo điều kiện kết cấu bê tông tiếp xúc với không khí bình thường rút ra từ kết quả thực nghiệm quá trình cacbonat hóa tốc độ cao [4].

Trên một hướng khác, một số dạng model vật lý đã kể tới quá trình thay đổi vi cấu trúc, thành phần hóa học, tiến trình động học và tiến trình hóa học của bột xi măng theo các áp lực CO_2 khác nhau [2; 16]. Những model này ít được các nhà thiết kế công trình sử dụng vì mất nhiều thời gian giải trên máy tính và đòi hỏi rất nhiều tham số đầu vào.

Để loại bỏ các hạn chế của các model khi phải ước định sức kháng cacbonat hóa tự nhiên và để dễ dàng trong việc tính toán, một model tính toán của Hyvert đã được lựa chọn để phục vụ trong nghiên cứu này, có kể đến các tham số đã biết về hỗn hợp bê tông và thành phần hóa học của xi măng và giả thiết về sự tiêu thụ hoàn toàn CO_2 ở bề mặt ranh giới vùng cacbonat/ không cacbonat [9]. Hơn nữa, hiệu ứng của khí CO_2 áp lực cao tới các phản ứng hóa học và quá trình khuếch tán được kể tới. Chiều sâu cacbonat được xác định theo công thức:

$$z_{c, \text{sim}} = \sqrt{\frac{2 P_0 t}{R T C_0} \frac{D_0}{\left(1 + \beta \text{CSH}_i \left(\frac{P_0}{P_{\text{atm}}} \right)^\alpha \right)}} \quad (2)$$

$$\text{với: } C_0 = CH_i + \frac{CSH_i}{\alpha + 1} \left(\frac{P_0}{P_{atm}} \right)^\alpha \quad (3)$$

trong đó CH_i (mol/l) là hàm lượng calci ban đầu trong porlandit, CSH_i (mol/l) là hàm lượng calci ban đầu trong C-S-H, P_0 (Pa) là áp lực khí CO_2 , P_{atm} (Pa) là áp lực khí quyển, R là hằng số khí lý tưởng (8.31 J/K.mol) và T (K) là nhiệt độ môi trường.

β (l/mol) phản ánh sự suy giảm về độ rỗng do quá trình cacbonat hóa thành phần C-S-H. α phản ánh tương quan hóa học giữa hàm lượng C-S-H gel theo áp lực khí CO_2 . Một khảo sát thực nghiệm tổng quát trên một vài loại xi măng và điều kiện áp lực đã thu được $\beta=2.35$ và $\alpha=0.67$ [8].

CH_i và CSH_i được xác định theo hàm lượng CaO và SiO_2 trong xi măng, theo tốc độ thủy hóa xi măng τ_h và tỷ lệ bột xi măng chứa trong bê tông φ_p , cả hai phụ thuộc vào tỷ lệ cấp phối bê tông. Trong trường hợp bê tông sử dụng xi măng CEM I không chứa phụ gia, các thành phần trên được xác định theo công thức sau:

$$CSH_i = 1.65 \tau_h \varphi_p SiO_2^* \quad (4)$$

$$CH_i = \tau_h \varphi_p CaO^* - CSH_i$$

với

$$SiO_2^* = SiO_2 (\rho_c^{-1} + W/C)^{-1} \quad (5)$$

$$CaO^* = CaO (\rho_c^{-1} + W/C)^{-1}$$

trong đó ρ_c là tỷ trọng của xi măng và W/C là tỷ số nước / xi măng.

4. Ứng dụng mạng xác suất Bayer

Ngày nay mạng xác suất Bayer được sử dụng rộng rãi và thường xuyên để cập nhật các hàm phân phối của các đối tượng quan tâm nhằm đánh giá lại chỉ số độ tin cậy công trình [11].

Bảng 2. Phân phối dự kiến và phân phối điều chỉnh

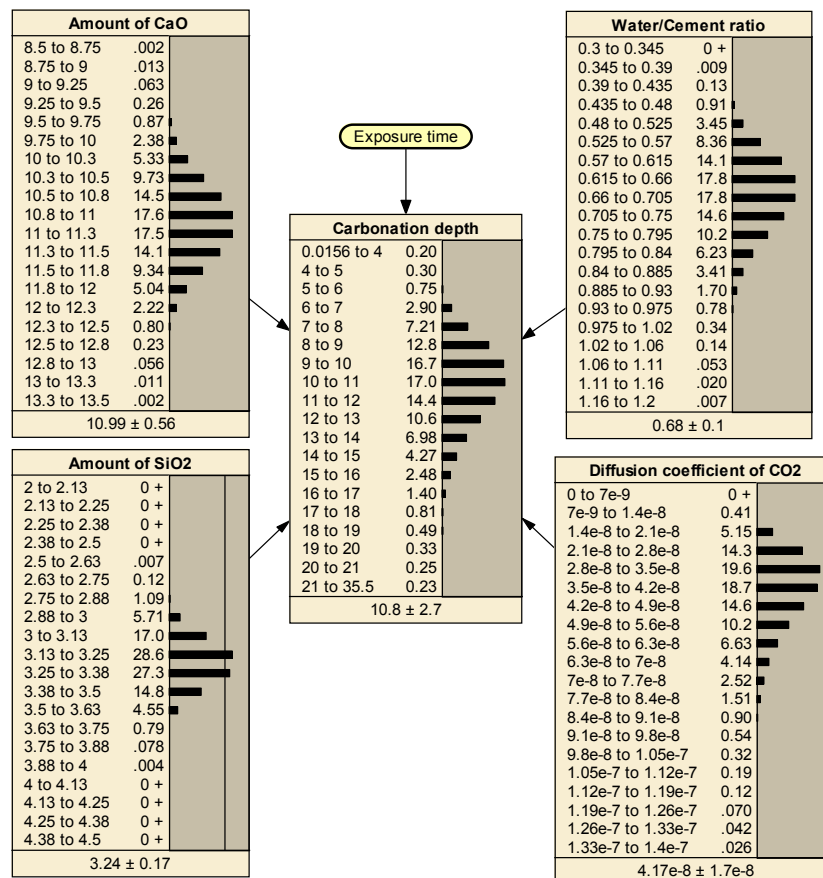
Biến số	Thời điểm cập nhật	Giá trị trung bình	Độ lệch
CaO mol/kg c Hàm phân phối: Normal	Ban đầu	10.99	0.55
	5 ngày	11.05	0.56
	7 ngày	11.09	0.56
	10 ngày	11.09	0.56
SiO_2 mol/kg c Normal	Ban đầu	3.24	0.162
	5 ngày	3.24	0.17
	7 ngày	3.24	0.17
	10 ngày	3.24	0.17
W/C Hàm phân phối: LogNor	Ban đầu	0.68	0.1
	5 ngày	0.657	0.1
	7 ngày	0.643	0.099
	10 ngày	0.654	0.097

Biến số	Thời điểm cập nhật	Giá trị trung bình	Độ lệch
D_0 $m^2/s \times 10^8$ Hàm phân phối: LogNor	Ban đầu	4.5	1.8
	5 ngày	3.26	1.65
	7 ngày	2.65	1.41
	10 ngày	2.82	0.84
$Z_{c,sim}$ mm	Ban đầu	10.8	2.9
	5 ngày	9.3	2.9
	7 ngày	9.7	3.2
	10 ngày	11.9	2.7
$Z_{c,exp}$ mm	5 ngày	8.4	2.8
	7 ngày	9.9	2.6
	10 ngày	12.3	1.7

Do khuôn khổ giới hạn của bài báo, nên trong phần tiếp theo chỉ trình bày nguyên lý chung tính toán và các kết quả tính toán với sự trợ giúp của chương trình Netica [13].

4.1 Xây dựng mạng Bayer cho bài toán

Mạng xác suất liên kết các tham số của bài toán được mô tả trong hình 4.



Hình 4. Sơ đồ mạng xác suất Bayer áp dụng cho bài toán nghiên cứu

Mạng xác suất Bayer là một công cụ hiệu quả và hữu ích khi một vài hàm phân phối dự kiến được cập nhật đồng thời. Bốn phân phối đầu vào được xét đến trong model cacbonat này cho các biến được giả thiết là độc lập sau: hàm lượng oxide calci ban đầu ($x_1=CaO$), hàm lượng silic ban đầu ($x_2=SiO_2$) chỉ số nước / xi măng ($x_3=W/C$) và hệ số khuếch tán khí cacbonic ($x_4=D_0$). Các hàm phân phối ban đầu được đề xuất dựa trên kết quả đo thực nghiệm và mô phỏng Monter Carlo và được trình bày trong bảng 2. Biến số đầu ra sẽ là chiều sâu carbonat của bê tông (z_c).

Sau khi rời rạc hóa tất cả các biến, bảng xác suất điều kiện được tính toán từ tập hợp của 500 số liệu mô phỏng cho mỗi trạng thái rời rạc. Hàm xác suất đầu cho biến đầu ra được tính theo biểu thức:

$$p(z_c) = \sum_{x_i} p(z_c | x_1, x_2, x_3, x_4) p(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (6)$$

4.2 Cập nhật các hàm phân phối

Kết quả quan sát chiều sâu cacbonat với một xác suất $p(z_c|o)$ cho mỗi trường hợp được rút ra từ quan hệ Bayer:

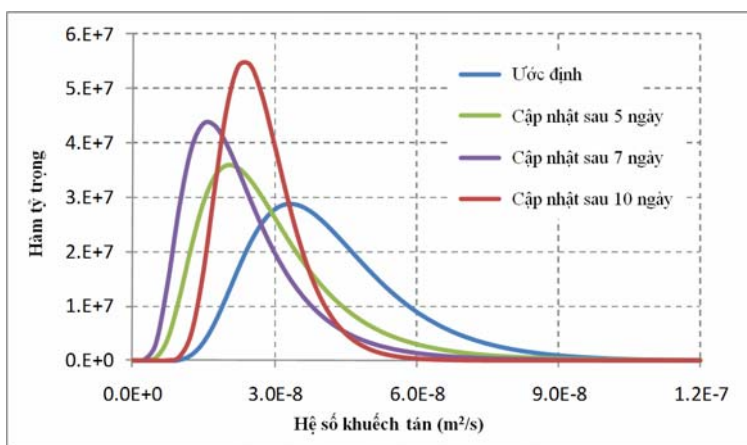
$$p(x_4|o) = p(x_4|z_c) p(z_c|o) \quad (7)$$

với:

$$p(x_4|z_c) = \frac{p(z_c|x_4) p(x_4)}{p(z_c)} \quad (8)$$

Việc cập nhật hàm phân phối được thực hiện ở các thời điểm 5 ngày, 7 ngày và 10 ngày. Đối với mỗi trường hợp cập nhật, hàm phân phối ban đầu sẽ là hàm điều chỉnh (kết quả) của lần cập nhật trước đó. Các hàm phân phối cập nhật được giới thiệu trong bảng 2 và trong hình từ 1 đến 3. Theo kết quả tính toán có thể nhận thấy các phân phối sau cập nhật của $z_{c,sim}$ có kết quả gần sát với thực nghiệm.

Một điểm khác nữa là sự giảm dần của hệ số biến thiên của mỗi biến, cá biệt đối với hệ số khuếch tán của CO_2 , được minh họa trong hình 5.



Hình 5. Phân phối của hệ số khuếch tán CO_2

Sự lựa chọn hàm phân phối để sử dụng sau đó (trong mục tiêu phân tích lại độ tin cậy) đòi hỏi tiêu chí lựa chọn trong số hàm điều chỉnh nhận được sau mỗi lần cập nhật. Trong nghiên cứu này, hàm phân phối được bảo lưu từ một tổ hợp một phân tán yếu của model xác

suất mà có thể được coi là một sản phẩm tự động của quá trình cập nhật mạng Bayer. Các đại lượng sau được tính sau mỗi lần cập nhật:

$$err = \frac{z_{c,exp}}{z_{c,sim}}$$

$$\chi^2 = \sum_{N_{meas}} \left(\frac{z_{c,exp,i} - z_{c,sim}}{z_{c,exp,i}} \right)^2 \quad (9)$$

Với $z_{c,sim}$ được tính với ý nghĩa là giá trị của hàm phân phối cập nhật.

Kết quả tính toán được thể hiện trong bảng 3, trong đó hàm phân phối ở lần điều chỉnh thứ 3 có kết quả khá lý tưởng.

Bảng 3. Tiêu chuẩn đánh giá cho hàm phân phối

Thời điểm cập nhật	Giá trị trung bình của err	Độ lệch của err	χ^2
5 ngày	0.888	0.301	17.03
7 ngày	1.003	0.261	5.02
10 ngày	0.996	0.132	1.64

4.3 Ước định thời gian thí nghiệm cacbonat hoá

Thời gian đặt mẫu trong buồng điều khiển quá trình cacbonat hóa với một xác suất cacbonat hóa lớp bê tông bảo vệ dự kiến được lựa chọn dựa theo hàm mật độ tích lũy được cập nhật ở các thời điểm 5 ngày, 7 ngày và 10 ngày. Kết quả được trình bày trong bảng 4 dưới đây:

Bảng 4. Thời gian ứng với xác suất cacbonat toàn bộ lớp bê tông bảo vệ

Chiều dày	Thời điểm cập nhật	Xác suất 50%	Xác suất 95%
15 mm	5 ngày	19 ngày	58 ngày
	7 ngày	21 ngày	59 ngày
	10 ngày	17 ngày	30 ngày
30 mm	5 ngày	73 ngày	234 ngày
	7 ngày	86 ngày	237 ngày
	10 ngày	66 ngày	ngày

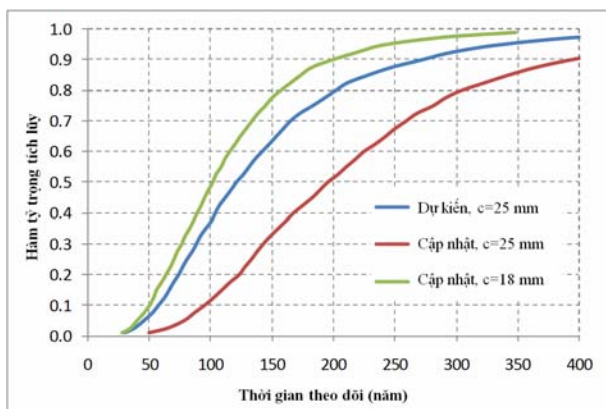
5. Phân tích độ tin cậy

Mặc dù có những nỗ lực nghiên cứu của các nhóm nghiên cứu được công bố trong thời gian gần đây [4, 10], trong các chỉ dẫn kỹ thuật của tiêu chuẩn Eurocode 2 [Eurocode, 2007] vẫn còn chưa đề cập đến ngưỡng độ tin cậy theo góc nhìn về sự kích hoạt ăn mòn chủ động ở cốt thép trong bê tông. Một trong những lý do có thể là tính phức tạp khó vận dụng của các model trong thực tế tính toán và thiếu nguồn dữ liệu về đặc tính môi trường rỗng của bê tông. Lý do nữa là sự lựa chọn về ngưỡng độ tin cậy không phải là nhiệm vụ dễ dàng. Một vài giá trị về chỉ số độ tin cậy của Hasofer-Lind đã được đề xuất, ở thời điểm hiện tại đang áp dụng $\beta=1.3$ [10], với giả thiết rằng trạng thái ăn mòn chủ động của cốt thép trong bê tông được kích hoạt khi toàn bộ lớp bê tông bảo vệ bị cacbonat hóa (tất nhiên với sự có mặt của khí oxy và hơi ẩm). Đối với các giá trị như vậy, xác suất tương ứng cho thời gian cacbonat hóa có thể chấp nhận ở mức 10%.

Theo tiêu chuẩn châu Âu về độ bền vững của lớp bê tông trong trường hợp nhóm môi trường tiếp xúc XC1, có cường độ chịu nén C25/30 (25 MPa đối với mẫu trụ tròn hoặc 30 MPa đối với mẫu lập phương) và nằm trong nhóm kết cấu S4 (có tuổi thọ tính toán là 50 năm) cần có chiều dày lớp bảo vệ tối thiểu $c_{\min, \text{dur}} + \Delta c_{\text{dev}} = 25 \text{ mm}$.

5.1 Phân tích từ thời gian của quá trình cacbonat hóa

Hàm tỷ trọng tích lũy của thời gian cacbonat hóa bê tông được trình bày trong hình 6 cho các trường hợp phân phối dự kiến ban đầu và phân phối điều chỉnh sau khi cập nhật. Hàm phân phối cho lớp bê tông bảo vệ được sử dụng trong bài toán này là Lognormal (hệ số biến thiên 20%).



Hình 6. Hàm tỷ trọng tích lũy của thời gian để cacbonat hóa hoàn toàn lớp bê tông bảo vệ

Trong các trường hợp trên, nhận thấy rằng khi lựa chọn tuổi thọ của công trình là 50 năm với xác suất tính toán là 10% sẽ cho phép giảm chiều dày lớp bê tông bảo vệ xuống dưới 25mm. Kết quả tính toán trong nghiên cứu này cho thấy có thể giảm còn 18mm như trong hình 6.

5.2 Phân tích từ chỉ số độ tin cậy

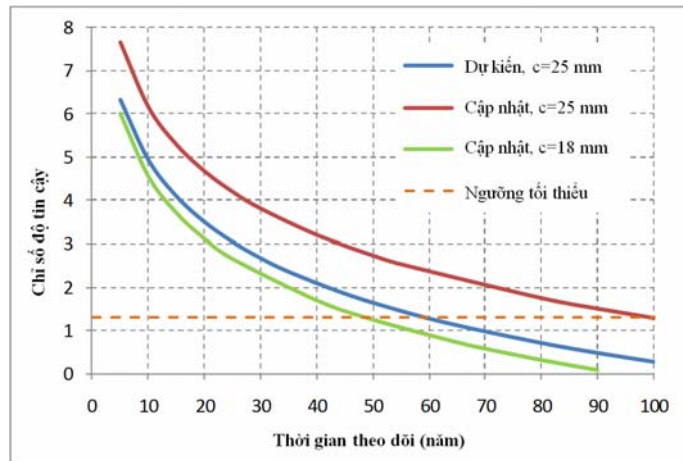
Chỉ số độ tin cậy Hasofer-Lind's được sử dụng khá phổ biến để đánh giá độ tin cậy và mức độ phục vụ trong tiêu chuẩn Eurocodes. Việc xác định chỉ số Hasofer-Lind chính là việc xác định bài toán tối ưu hóa. Tham số cần giảm thiểu chính là khoảng cách Euclide $\|u\|$ trong không gian chuẩn hóa với ràng buộc $G(u)=0$, với $G()$ là hàm biểu thị trạng thái giới hạn. Một số thuật toán có hiệu quả đã được sử dụng để giải phương trình này [1; 12]. Trong nghiên cứu này, thuật toán Rackwitz-Fiessler [15] đã được áp dụng.

Trong không gian vật lý, hàm này được biểu thị dưới dạng sau:

$$G(x_1, x_2, x_3, x_4, \text{err}, c) = c - \text{err} \cdot z_{c, \text{sim}}(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (10)$$

Sự biến thiên về chỉ số độ tin cậy được trình bày trong hình 7 cho trường hợp hàm phân phối dự kiến ban đầu và hàm phân phối điều chỉnh sau lần cập nhật cuối cùng.

Nhận thấy rằng chỉ số độ tin cậy giảm dần theo thời gian. Kết quả này cũng đã được khẳng định trong một nghiên cứu gần đây về quá trình cacbonat hóa bê tông [3]. Qua kết quả tính toán được trình bày trong hình 7, nhận thấy rằng việc giảm chiều dày lớp bảo vệ xuống còn 18mm vẫn đáp ứng được ngưỡng chỉ số độ tin cậy ở mức chấp nhận $\beta=1.3$ trong Eurocode 2.



Hình 7. Diễn biến của chỉ số độ tin cậy theo thời gian

6. Kết luận

Trong nghiên cứu này đã đề cập tới một vài điểm tiếp cận cách tính toán kết cấu bê tông cốt thép có kể đến độ bền vững theo thời gian do hiện tượng cacbonat hóa.

Điểm đầu tiên được đề cập với những hiểu biết về hiện tượng cacbonat hóa bê tông thông qua khảo sát thực nghiệm trong phòng thí nghiệm có sự hỗ trợ thêm của các model tính toán. Việc quan sát, theo dõi diễn biến của quá trình cacbonat hóa bê tông, đo đạc các thông số liên quan đã được thực hiện. Một model tính toán thời gian cacbonat hóa bê tông đã được lựa chọn có kể đến hiệu ứng áp lực cao của khí CO_2 trong phòng thí nghiệm, cho phép điều chỉnh và sử dụng dễ dàng trong điều kiện cacbonat tự nhiên.

Điểm thứ hai hướng tới mục tiêu cập nhật về hàm phân phối tham gia trong model khi sử dụng model này trong không gian xác suất. Mạng xác suất Bayer đã được sử dụng cho việc cập nhật này. Mạng Bayer là một công cụ rất mạnh cho phép cập nhật đồng thời nhiều hàm phân phối. Việc cập nhật giúp cho một mặt hỗ trợ định hướng thí nghiệm, mặt khác cho phép cải thiện tính toán thiết kế có kể đến độ bền vững của công trình.

Điểm thứ ba được dành riêng cho việc tiếp cận xác suất nhằm biện luận và điều chỉnh một số giải pháp thiết kế liên quan đến độ bền vững của công trình trong sự phù hợp với các quy định trong tiêu chuẩn kỹ thuật.

Trong số hai đối tượng được lựa chọn để phân tích chỉ số độ tin cậy trong không gian xác suất, việc sử dụng hàm tỷ trọng tích lũy của thời gian cacbonat hóa cho thấy sự hợp lý và dễ dàng trong quá trình tính toán. Việc phân tích chỉ số độ tin cậy theo hướng giải bài toán hàm trạng thái giới hạn đã sử dụng thuật toán Rackwitz-Fiessler. Cả hai hướng tính toán đã cho ra những kết quả tương tự.

Các nội dung đã phân tích ở trên sẽ giúp cho các nhà thiết kế điều chỉnh bài toán tính toán độ bền vững công trình sát với diễn biến thực tế, xây dựng các chiến lược bảo trì công trình ngay từ khâu thiết kế nhằm đưa công trình vào khai thác đạt được hiệu quả cao nhất.

Tài liệu tham khảo

1. Abdo, T., Rackwitz, R. (1991), *A new b-point algorithm for large time-invariant and time-variant reliability problems*. Proc. of the 3rd IFIP WG 7.5, Der Kiureghian A. and Thoft-Christensen P. (ed.).

2. Bary B., Sellier A. (2004) "Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete", *Cement and Concrete Research*, 34: 1859-1872.
3. Duprat F., Sellier A. (2006), "Probabilistic approach to corrosion risk due to carbonation via an adaptive response surface method", *Probabilistic Engineering Mechanics* 21: 207-216
4. Duracrete 2000. Probabilistic performance based durability design of concrete structures, Brite Euram Project BE95-1347.
5. Norme EN 206-1, AFNOR (ed.), Paris.
6. Eurocode 2. EN 1992-1-1, 2007, *Design of concrete structures, General rules and rules for buildings*, AFNOR (ed.), Paris.
7. French Society of Civil Engineers (2004), *Concrete design for a prescribed durability* (in French), AFGC (ed.), Paris.
8. Use of the probabilistic approach for the durability design of precast concrete products, PhD Thesis, Toulouse University (in French).
9. Hyvert N., Sellier A., Duprat F., Rougeau P. Francisco P. (2010), *Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation*, *Cement and Concrete Research*.
10. International Federation of Structural Concrete (2006), Model Code for Service Life Design, IFSC-fib (ed.), Lausanne.
11. Joint Committee of Structural Safety (2001), Probabilistic Model Code, available on www.jcss.ethz.ch.
12. Liu P.L., Der Kiureghian A (1991), "Optimization algorithms for structural reliability", *Structural Safety*, 9: 161-178.
13. Norsys 2008, Netica Software 4.08.
14. Papadakis V.G., Vayenas C.G., Fardis M.N., (1991), "Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation", *ACI Materials Journal*, 88: 363-373.
15. Rackwitz R. and Fiessler B. (1979), "Structural reliability under combined random load sequences", *Computers & Structures*, 9: 489-494
16. Thiery M., Villain G., Dangla P., Platret G. (2007), "Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: effects of the chemical kinetics", *Cement and Concrete Research*, 37: 1047-1058.