

Mô hình dự báo từ biến của bê tông tự lèn

Hoàng Vĩnh Long¹, Nguyễn Xuân Bách^{2,*}, Nguyễn Quang Long³

¹Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

²Viện Nghiên cứu và ứng dụng vật liệu xây dựng nhiệt đới

³Công ty cổ phần Tư vấn thiết kế, giám sát xây dựng và thương mại Hà Nội

TỪ KHOÁ

Bê tông
Bê tông tự lèn
Từ biến
Mô hình dự báo từ biến

TÓM TẮT

Hiện nay, nhiều mô hình dự báo từ biến của bê tông đã được phát triển bởi các tổ chức như: Hiệp hội Bê tông Quốc tế, Ủy ban Tiêu chuẩn hóa Châu Âu, Hiệp hội Kỹ sư xây dựng Nhật Bản, v.v. Một số mô hình cũng đã được điều chỉnh để phù hợp với từ biến của bê tông tự lèn (BTTL). Tuy nhiên, những mô hình này vẫn có sai số tương đối lớn khi dự báo từ biến của BTTL. Bài báo này trình bày mô hình dự báo từ biến của BTTL FIB-SCC2024, được xây dựng trên cơ sở tham khảo và điều chỉnh từ mô hình gốc là mô hình fib MC2010 có độ chính xác được cải thiện đáng kể và cao hơn một số mô hình khác trong dự báo từ biến của BTTL. Cơ sở dữ liệu dùng trong xây dựng mô hình gồm số liệu từ 168 đường cong từ biến của 32 tài liệu được công bố từ năm 1998 đến năm 2023. Việc ứng dụng mô hình FIB-SCC2024 trong tính toán thiết kế các kết cấu sử dụng BTTL sẽ góp phần giảm chi phí xây dựng, bảo trì và cải thiện độ bền công trình.

KEYWORDS

Concrete
Self compacting concrete
Creep
Prediction model of creep strain

ABSTRACT

Currently, many models for predicting creep of concrete have been developed by organizations such as: International Concrete Association, European Committee for Standardization, Japan Society of Civil Engineers, etc. Some models have also been adjusted to suit the creep of self-compacting concrete (SCC). However, these models still have relatively large errors when predicting creep of SCC. This paper presents the creep prediction model of SCC FIB-SCC2024, which is built on the basis of reference and adjustment from the original model, the MC2010 fib model, with significantly improved accuracy and higher than some other models in predicting creep of SCC. The database used in model building includes data from 168 creep curves of 32 documents published from 1998 to 2023. The application of the FIB-SCC2024 model in the design calculation of structures using reinforced concrete will contribute to reducing construction and maintenance costs and improving the durability of the structure.

1. Giới thiệu

Từ biến là hiện tượng gia tăng biến dạng theo thời gian dưới tác dụng của tải trọng dài hạn. Cùng với co ngót, từ biến là tác nhân phụ thuộc vào thời gian và có vai trò quan trọng trong việc tính toán, thiết kế công trình do những ảnh hưởng tích cực hoặc tiêu cực của nó đến kết cấu. Trong kết cấu dự ứng lực, từ biến gây ra thiếu hụt ứng suất trong cốt thép; trong các bộ phận chịu uốn và nén lệch tâm, từ biến làm tăng độ võng và giảm sự ổn định của kết cấu. Ảnh hưởng tích cực của từ biến được thể hiện trong việc phân bố lại ứng suất trong kết cấu bê tông cốt thép và các hệ siêu tĩnh, làm tăng tính dẻo của bê tông, có ý nghĩa quan trọng để nâng cao khả năng chống nứt của các kết cấu vỏ và kết cấu đặc biệt [1].

Từ biến bao gồm từ biến cơ bản và từ biến khô. Từ biến cơ bản được xác định khi mẫu bê tông chịu tải trọng nhưng không mất độ ẩm, thường trong trường hợp bê tông được bảo dưỡng ngâm nước. Từ biến khô là chênh lệch từ biến khi bê tông mất dần độ ẩm (làm khô) so với khi bê tông không bị mất độ ẩm. Từ biến tổng là tổng của

từ biến cơ bản và từ biến khô.

Bê tông tự lèn (BTTL) là loại bê tông mà ở trạng thái hỗn hợp có thể tự chảy và tự lèn chặt do khối lượng bản thân, có khả năng điền đầy khuôn kể cả khi có cốt thép dày đặc, v.v nhưng vẫn duy trì được độ đồng nhất [2].

Trên thế giới, nhiều mô hình dự báo từ biến của bê tông đã được phát triển. Do sự khác nhau về thành phần nguyên vật liệu cũng như cấu trúc, tính chất nên sự ảnh hưởng của các yếu tố đến từ biến của BTTL cũng sẽ khác với bê tông thường. Vì vậy, một số mô hình cũng đã được các nhà khoa học điều chỉnh để phù hợp với từ biến của BTTL [3-6]. Tuy nhiên, những mô hình này vẫn có độ chính xác chưa cao khi dự báo từ biến của BTTL với nguyên nhân chủ yếu do cơ sở dữ liệu còn khá nhỏ. Trong khi đó, nhu cầu sử dụng BTTL đang ngày càng tăng cho các kết cấu có mật độ cốt thép lớn như nhà siêu cao tầng, kết cấu có hình dạng phức tạp, nhiều góc cạnh.

Từ các vấn đề nêu trên, trong bài báo này sẽ trình bày về mô hình dự báo từ biến của BTTL FIB-SCC2024, được xây dựng trên cơ sở tham khảo và điều chỉnh một số mô hình của các tác giả trước.

*Liên hệ tác giả: printemps.cent@gmail.com

Nhận ngày 12/04/2025, sửa xong ngày 05/06/2025, chấp nhận đăng ngày 06/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2025.908>

Cơ sở dữ liệu dùng trong đánh giá và điều chỉnh mô hình được thu thập từ các nghiên cứu được công bố trên thế giới và được quản lý bằng phần mềm Excel và Microsoft SQL Server. Ngôn ngữ lập trình Python được sử dụng để khởi chạy và đánh giá mô hình do Python có khả năng làm việc với khối lượng dữ liệu lớn và tiềm năng cao trong lĩnh vực khoa học dữ liệu và phân tích dữ liệu. Để đơn giản hóa việc phân tích, nghiên cứu chủ yếu sử dụng hệ số tương quan (R^2) và sai số căn quân phương tiêu chuẩn (NRMSE) để đánh giá độ chính xác cũng như tối ưu hóa mô hình.

2. Cơ sở dữ liệu từ biến của BTTL

Trong các tài liệu được công bố, số liệu từ biểu đồ đường cong từ biến được đọc thông qua phần mềm trực tuyến WebPlotDigitizer theo địa chỉ <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>, các thông số được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho các mô hình cũng đồng thời được thu thập và nhập vào Excel. Sau đó, cơ sở dữ liệu sẽ được

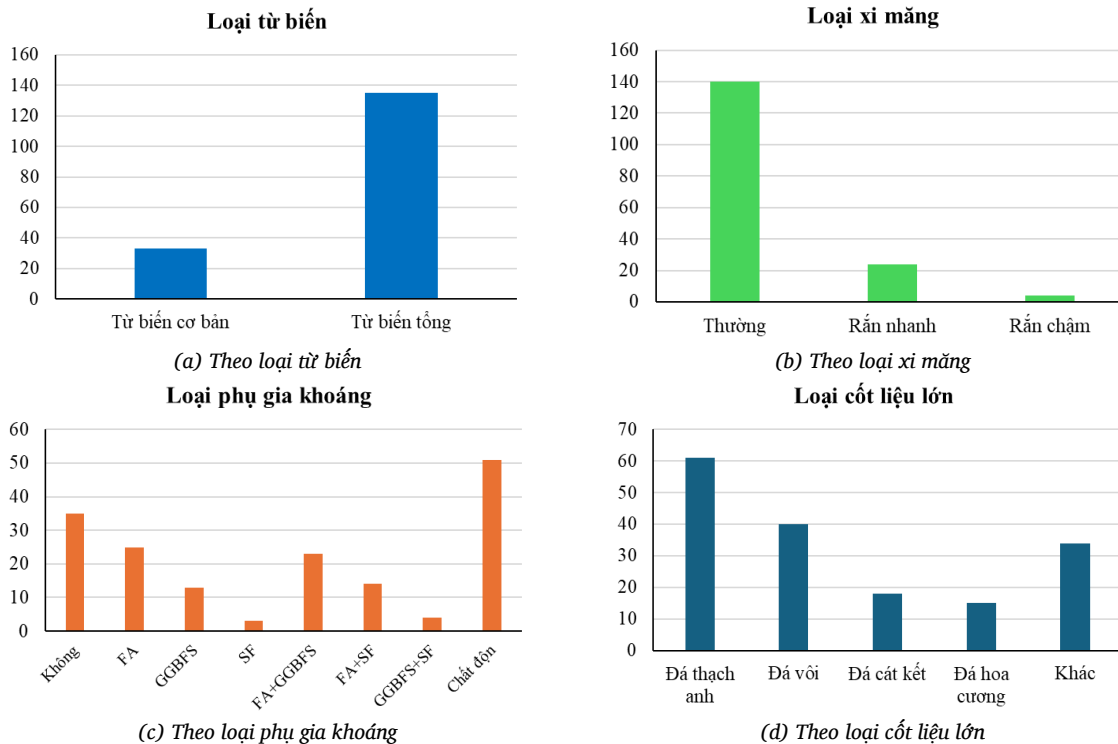
chuyển đổi từ Excel sang máy chủ SQL (Microsoft SQL Server) bằng địa chỉ <https://sqlizer.io/#/>.

Cơ sở dữ liệu từ biến của BTTL dùng trong xây dựng mô hình gồm số liệu từ 168 đường cong từ biến của 32 tài liệu được công bố từ năm 1998 đến năm 2023. Trong số 168 đường cong thì 33 đường cong là từ biến cơ bản và 135 đường cong là từ biến tổng. Số liệu về từ biến cơ bản còn rất hạn chế do các nghiên cứu về từ biến cơ bản chưa phổ biến. Cấp phối sử dụng xi măng thường chiếm phần lớn (83.3 %), cấp phối sử dụng xi măng rắn nhanh chiếm 14.3 % và cấp phối sử dụng xi măng rắn chậm chỉ chiếm 2.4 % (xi măng được phân loại theo cách phân loại của mô hình B4 [7] (dựa theo ASTM C150 [8]) hoặc mô hình fib MC2010 [9] (dựa theo EN 197-1 [10])). Trong cơ sở dữ liệu, cấp phối có sử dụng phụ gia khoáng chiếm phần lớn (79,2 %). Cốt liệu lớn được sử dụng chủ yếu là đá thạch anh (35.7 %) và đá vôi (23.8 %). Các thông số chung và phân loại của cơ sở dữ liệu được trình bày trong Bảng 1 và Hình 1.

Bảng 1. Các thông số chung của cơ sở dữ liệu từ biến của BTTL.

Giá trị	Thông số						
	cm (kg/m ³)	w/cm	a/cm	fa (kg/m ³)	ca (kg/m ³)	D _{max} (mm)	f _{cm28} (MPa)
Lớn nhất	645	0,58	5,17	1148	1102	32	93
Nhỏ nhất	300	0,25	2,36	519	453	8	25
Trung bình	457	0,41	3,66	835	781	14	56

Chú thích: cm là hàm lượng chất kết dính; w/cm là tỷ lệ nước/ chất kết dính; a/cm là tỷ lệ cốt liệu/ chất kết dính; fa là hàm lượng cốt liệu nhỏ; ca là hàm lượng cốt liệu lớn; D_{max} là kích thước hạt lớn nhất danh nghĩa của cốt liệu lớn; f_{cm28} là cường độ nén 28 ngày.



Hình 1. Phân loại cơ sở dữ liệu từ biến của BTTL.

3. Một số mô hình dự báo từ biến

Hiện nay có nhiều mô hình dự báo từ biến của bê tông được đề xuất bởi các tổ chức như Hiệp hội Bê tông Quốc tế (*fib*), Viện Bê tông Hoa Kỳ (ACI), Hiệp hội Kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE), v.v.

- Mô hình ACI 209R-92: Đây là mô hình thực nghiệm được phát triển bởi Branson và Christason từ năm 1971 [11].
- Mô hình CEB-FIB: Một số phiên bản khác nhau của mô hình CEB-FIB là CEB 1970 [12], CEB 1978 [13], CEB MC90 [14], CEB MC 90-99 [15] và *fib* MC2010 [9]. Mô hình *fib* MC2010 khá tương đồng với mô hình CEB MC90-99 được phát triển bởi Müller và Hilsdorf.
- Mô hình JSCE: được phát triển bởi Hiệp hội Kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE), là một phần của tiêu chuẩn Yêu cầu kỹ thuật cho Kết cấu bê tông [16].
- Mô hình B3, B4: được phát triển bởi Zdeněk P. Bazant và ccs tại Đại học Northwestern [7, 17]. Mô hình B4 mở rộng và cân bằng hệ thống lý thuyết của mô hình B3. Ngoài ra, mô hình B4 còn tính đến sự ảnh hưởng của loại xi măng, phụ gia khoáng, phụ gia hóa học, cốt liệu, v.v và có thể dự báo trong thời gian vài thập kỷ.
- Một số mô hình đã được một số tác giả điều chỉnh để phù hợp với từ biến của BTTL như:
- Mô hình CEB90 (Poppe 2005): được điều chỉnh từ mô hình CEB MC90 bởi Poppe và ccs [3], bổ sung thêm hệ số liên quan đến tỷ lệ xi măng/ chất kết dính.
- Mô hình CEB90 (Kavanaugh 2008): được điều chỉnh từ mô hình CEB MC90 bởi Kavanaugh [4]. Một số hệ số được điều chỉnh để áp dụng cho dự đoán từ biến của BTTL ở cả hai trường hợp dưỡng hộ nhiệt ẩm và không dưỡng hộ nhiệt ẩm.
- Mô hình JSCE (Aslani 2013): được điều chỉnh từ mô hình JSCE bởi Aslani và ccs [5], bổ sung thêm hệ số liên quan đến tỷ lệ xi măng/ chất kết dính và điều chỉnh một vài hệ số khác.
- Mô hình B4TW-SCC: được điều chỉnh từ mô hình B4 bởi Nguyễn Doãn Bình [6] tại Đại học Đà Loan, bổ sung thêm hệ số liên quan đến hàm lượng chất kết dính và cốt liệu lớn.

Các mô hình dự báo từ biến của bê tông được xây dựng trên cơ sở các yếu tố ảnh hưởng đến từ biến. Sự ảnh hưởng của các yếu tố này đến từ biến được đánh giá và biến đổi thành các công thức toán học. Thông qua các công thức toán học này, từ biến của bê tông có thể được tính toán từ các thông số liên quan đến những yếu tố ảnh hưởng đến từ biến. Các yếu tố ảnh hưởng đến từ biến được sử dụng bởi một số mô hình hiện nay được trình bày trong Bảng 2.

4. Đánh giá một số mô hình dự báo từ biến

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ đánh giá 8 mô hình gồm: *fib* MC2010, B4, ACI209R-92, CEB MC90, JSCE, CEB90 (Poppe 2005), CEB90 (Kavanaugh 2008) và JSCE (Aslani 2013). Để đơn giản hóa việc phân tích, nghiên cứu chủ yếu sử dụng hai hệ số R^2 và $NRMSE$ để đánh giá độ chính xác của mô hình cũng như tối ưu hóa mô hình. Giá trị hàm từ biến (J) sẽ được sử dụng để đánh giá các mô

hình trong đề án này. Hàm từ biến là tổng của biến dạng đàn hồi và biến dạng từ biến tạo ra bởi một đơn vị ứng suất. Trên đồ thị, giá trị hàm từ biến thực tế được thể hiện theo trục hoành (trục x) và giá trị hàm từ biến dự báo được thể hiện theo trục tung (trục y). Ngoài ra, trên đồ thị còn có đường chuẩn $x = y$ và 2 hai đường thể hiện giới hạn sai số $\pm 40 \%$.

4.1. Các chỉ số đánh giá độ chính xác của mô hình

a) Hệ số tương quan (R^2)

Hệ số tương quan R^2 được sử dụng trong phương pháp hồi quy để kiểm tra nhanh tính tương thích giữa giá trị dự đoán và giá trị thực tế. Hệ số tương quan R^2 có giá trị từ 0 đến 1 và được tính theo công thức (1).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

trong đó SS_{res} là tổng độ lệch bình phương phần dư; SS_{tot} là tổng độ lệch bình phương toàn bộ; x_i là giá trị thực tế; $\hat{x}_i$ là giá trị dự đoán; n là số lượng điểm dữ liệu đang xét; $\bar{x}$ là giá trị thực tế trung bình, được tính theo công thức (2).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

b) Sai số quân phương, sai số căn quân phương và sai số căn quân phương tiêu chuẩn

Sai số quân phương (MSE) là trung bình của bình phương sai số giữa giá trị dự đoán (x_i) và giá trị thực tế ($\hat{x}_i$), như trình bày trong công thức (3).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (3)$$

Sai số căn quân phương ($RMSE$) là căn bậc hai của sai số quân phương, như trình bày trong công thức (4).

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (4)$$

Sai số căn quân phương tiêu chuẩn $NRMSE$ là một chỉ số ổn định tiêu chuẩn dùng để đánh giá mô hình. Cách tính toán $NRMSE$ phụ thuộc vào phương pháp đo. Trong nghiên cứu này, $NRMSE$ sẽ được tính theo tỷ số giữa sai số căn quân phương và giá trị thực tế trung bình.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (5)$$

trong đó $\bar{x}$ là giá trị thực tế trung bình, được tính theo công thức (2).

4.2. Đánh giá khả năng dự báo từ biến cơ bản của một số mô hình

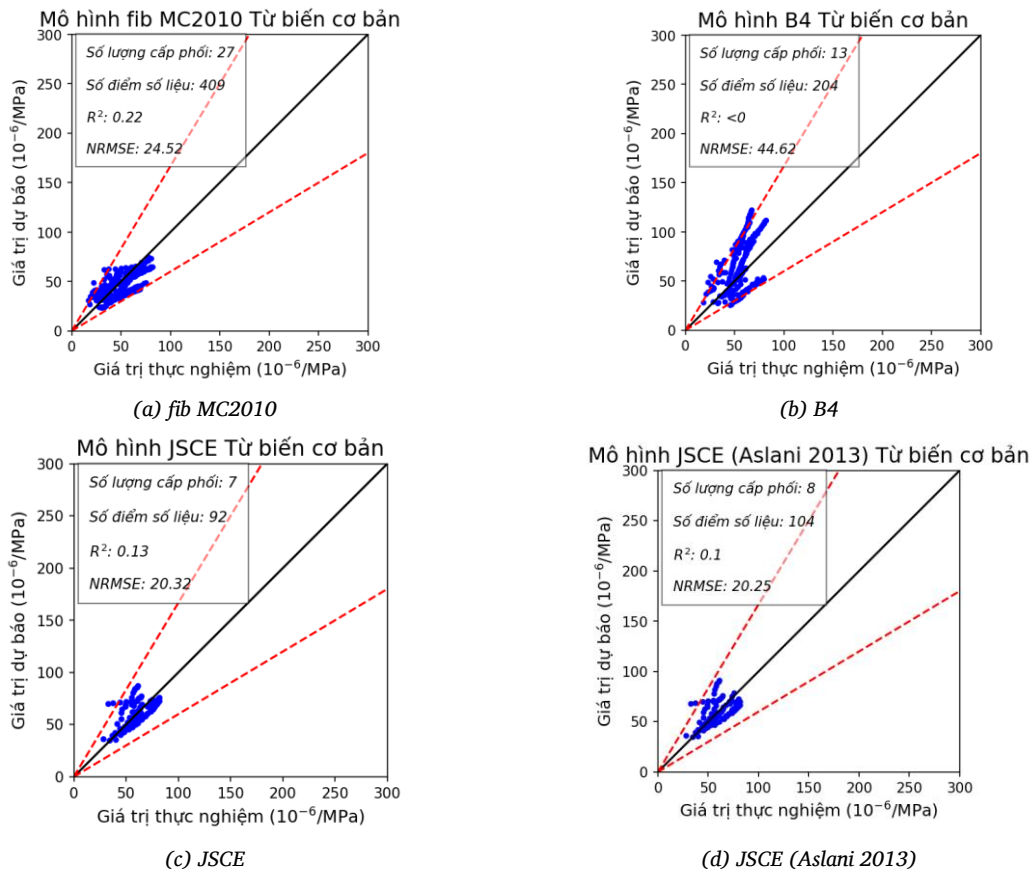
Trong 8 mô hình được xem xét, chỉ có 4 mô hình gồm *fib* MC2010, B4, JSCE và JSCE (Aslani 2013) có thể dự báo từ biến cơ bản. Như trình bày trong Hình 2, có thể thấy rằng mô hình *fib*

MC2010 là mô hình tốt nhất đối với dự báo từ biến cơ bản. Ngoài ra, điều kiện áp dụng của mô hình B4, JSCE và JSCE (Aslani 2013) hẹp hơn đáng kể so với mô hình fib MC2010.

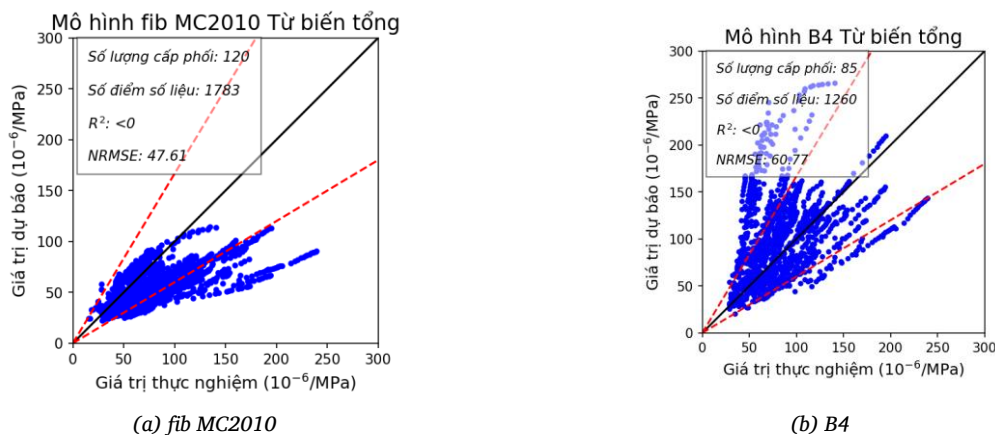
4.3. Đánh giá một số mô hình dự báo từ biến tổng

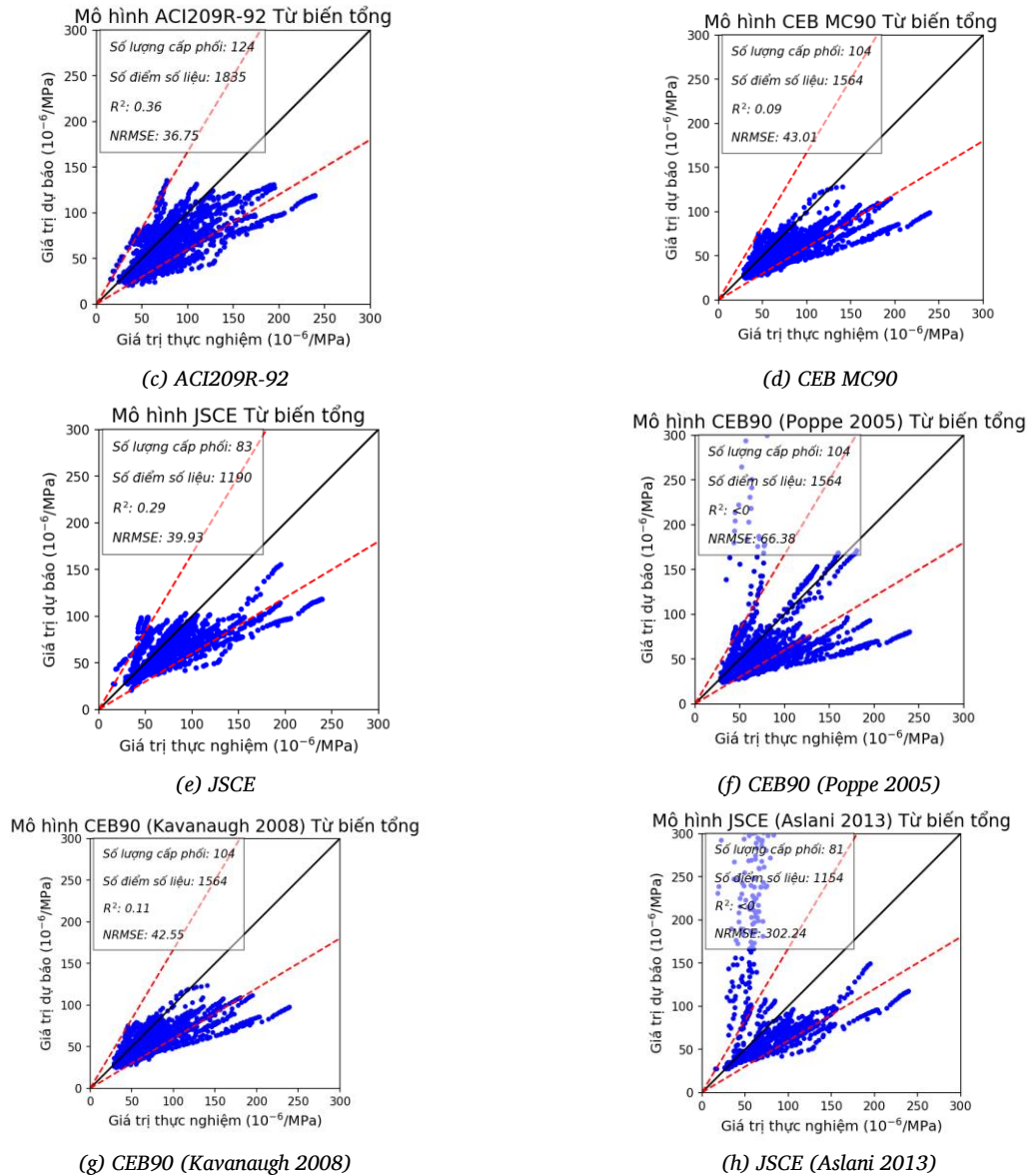
Hình 3 trình bày các đồ thị so sánh giá trị hàm từ biến dự báo và thực nghiệm của 8 mô hình. Có thể thấy rằng, mô hình ACI209R-92 có độ chính xác cao nhất nhưng giá trị dự báo vẫn có xu hướng

thấp hơn giá trị thực nghiệm. Mô hình fib MC2010, CEB MC90, JSCE và mô hình CEB90 (Kavanaugh 2008) cũng có xu hướng dự báo từ biến thấp hơn thực tế. Các mô hình còn lại không có xu hướng rõ ràng. Mô hình JSCE (Aslani 2013) có sai số lớn nhất với $NRMSE$ lên tới 302,24 %, cao hơn rất nhiều so với các mô hình còn lại. Ngoài ra, điều kiện áp dụng của mô hình này cũng hẹp hơn đáng kể so với các mô hình khác. Số lượng cấp phối áp dụng được với mô hình này chỉ đạt 81 trong tổng số 135 cấp phối của cơ sở dữ liệu.



Hình 2. Đánh giá một số mô hình dự báo từ biến cơ bản.





Hình 3. Đánh giá một số mô hình dự báo từ biến tổng.

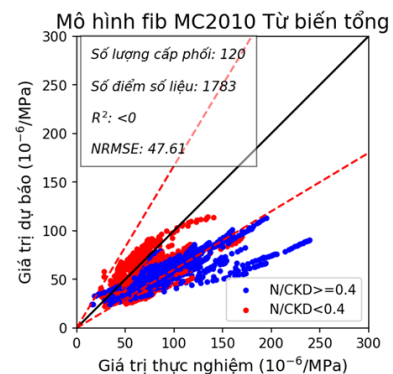
5. Mô hình dự báo từ biến của BTTL FIB-SCC2024

Mô hình fib MC2010 sẽ là mô hình chính được tham khảo để xây dựng mô hình dự báo từ biến của BTTL FIB-SCC2024 vì một vài lý do sau:

Thứ nhất, mô hình này được phát triển bởi Hiệp hội Bê tông Quốc tế, có thể dự đoán cả từ biến cơ bản và từ biến tổng mà ít mô hình khác có thể đáp ứng được.

Thứ hai, mô hình fib MC2010 sử dụng cường độ nén ở tuổi 28 ngày làm thông số chính trong tính toán từ biến, đây là thông số phổ biến và dễ xác định, có thể áp dụng rộng rãi. Hơn nữa, điều kiện áp dụng của mô hình fib MC2010 cũng rộng hơn đa số các mô hình khác.

Thứ ba, khi áp dụng mô hình fib MC2010 cho BTTL thì độ chính xác còn chưa tối ưu. Do đó, việc điều chỉnh mô hình này sao cho phù hợp với từ biến BTTL là cần thiết.



Hình 4. Mô hình fib MC2010 với tỷ lệ N/CKD khác nhau.

Nhìn chung, các công thức tính toán của mô hình fib MC2010 cần cải thiện một số hệ số tính toán. Ngoài ra, hệ số liên quan đến tỷ lệ nước/ chất kết dính ($\beta_{dc}(w/cm)$) sẽ được bổ sung vào mô hình vì tỷ lệ này có ảnh hưởng rất lớn đến sai số của mô hình fib MC2010. Như trình bày trong Hình 4, mô hình có sự phân tán về 2 phía đối với tỷ lệ $N/CKD \geq 0,4$ và $< 0,4$.

Các điều chỉnh của mô hình FIB-SCC2024 so với mô hình fib MC2010 được trình bày trong Bảng 2.

Chú thích: $J(t, t_0)$ là hàm từ biến; $\varphi(t, t_0)$ là hệ số từ biến; E_{cm0} là mô đun đàn hồi của bê tông tại tuổi đặt tải; E_{cm28} là mô đun đàn hồi của bê tông tại tuổi 28 ngày; $\varphi_{bc}(t, t_0)$ là hệ số từ biến cơ bản; $\varphi_{dc}(t, t_0)$ là hệ số từ biến khô; φ_T là hệ số ảnh hưởng của nhiệt độ đến từ biến; $\Delta\varphi_T$ là hệ số biến dạng nhiệt tạm thời; $\beta_{bc}(f_{cm})$ là hệ số ảnh hưởng của cường độ nén đến từ biến cơ bản; $\beta_{bc}(t, t_0)$ là hệ số phát triển từ biến cơ bản theo thời gian; $\beta_{dc}(f_{cm})$ là hệ số ảnh hưởng của cường độ nén đến từ biến khô; $\beta(RH)$ là hệ số ảnh hưởng của độ ẩm môi trường đến từ biến khô; $\beta_{dc}(t_0)$ là hệ số ảnh hưởng của tuổi đặt tải đến từ biến khô; $\beta_{dc}(t, t_0)$ là hệ số phát triển từ biến khô theo thời gian; $\beta_{dc}(w/cm)$ là hệ số ảnh hưởng của tỷ lệ nước/chất kết dính đến từ biến khô; f_{cm28} là cường độ nén 28 ngày của bê tông; w/cm là tỉ lệ nước/chất kết dính.

Do cơ sở dữ liệu từ biến của BTTL thu thập được chưa đủ lớn nên phạm vi áp dụng của mô hình còn hạn chế. Số lượng cấp phối sử

dụng xi măng rắn nhanh và rắn chậm trong cơ sở dữ liệu còn rất hạn chế nên mô hình FIB-SCC2024 sẽ chỉ giới hạn cho dự báo từ biến của BTTL sử dụng xi măng thường. Việc đánh giá các mô hình ở mục này cũng chỉ giới hạn cho số liệu từ biến của BTTL sử dụng xi măng thường. Mô hình FIB-SCC2024 có thể áp dụng cho BTTL không sử dụng các phụ gia đóng rắn chậm, đóng rắn nhanh và phụ gia trương nở. Các giới hạn thông số khác sẽ theo giới hạn của cơ sở dữ liệu thu thập được và được trình bày trong Bảng 3.

Hình 5 cho thấy, đối với dự báo từ biến cơ bản của BTTL, mô hình FIB-SCC2024 có sự cải thiện nhỏ so với mô hình fib MC2010. Hệ số tương quan R^2 tăng từ 0,22 lên 0,37 và sai số căn quân phương tiêu chuẩn $NRMSE$ giảm từ 24,68 % xuống 22 %. Nhìn chung, mô hình FIB-SCC2024 là mô hình dự báo từ biến cơ bản tốt nhất trong 5 mô hình.

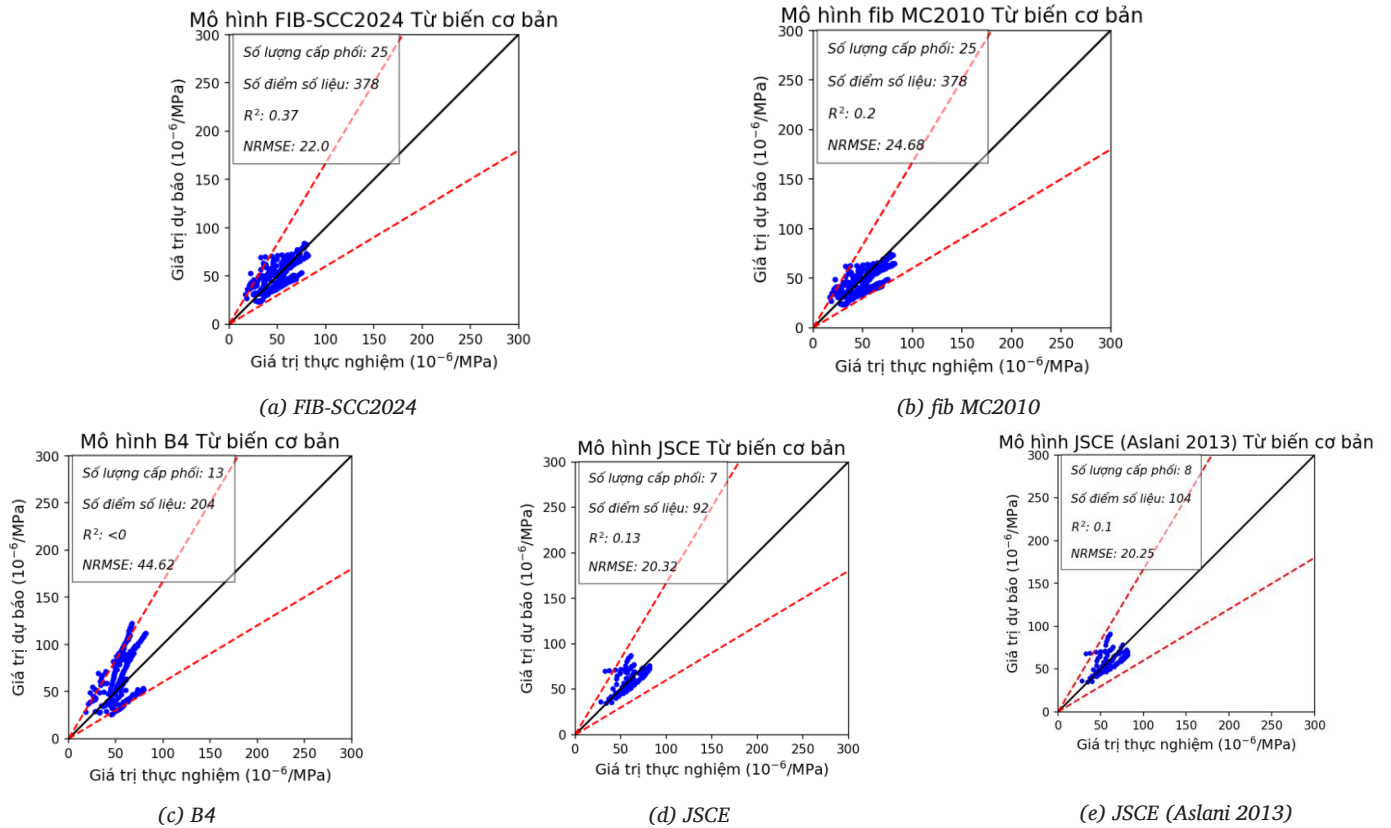
Hình 6 cho thấy đối với dự báo từ biến tổng của BTTL, độ chính xác của mô hình FIB-SCC2024 được cải thiện đáng kể so với mô hình fib MC2010. Hệ số tương quan R^2 được cải thiện từ 0,07 lên đến 0,62, sai số căn quân phương tiêu chuẩn $NRMSE$ được giảm từ 38,98 % xuống còn 24,95 % (giảm ≈ 36 %). Ngoài ra, đa số các điểm số liệu của mô hình FIB-SCC2024 đều nằm trong vùng sai số ± 40 %. So sánh với các mô hình còn lại thì mô hình FIB-SCC2024 có sai số thấp hơn đáng kể.

Bảng 2. Các điều chỉnh của mô hình FIB-SCC2024 so với mô hình fib MC2010.

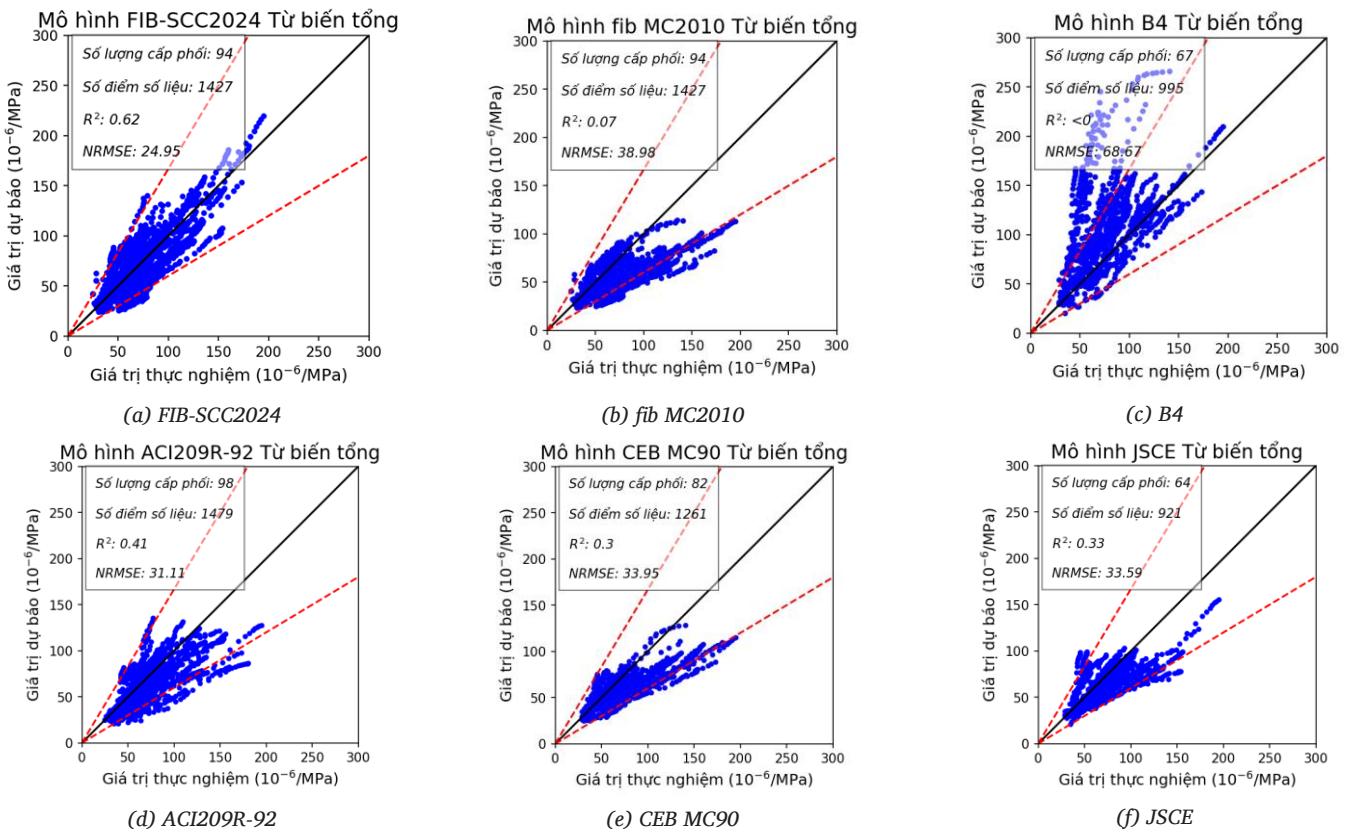
	Mô hình fib MC2010	Mô hình FIB-SCC2024
Hàm từ biến	$J(t, t_0) = \frac{1}{E_{cm0}} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{cm28}}$	
Hệ số từ biến	$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) \cdot \varphi_T + \varphi_{dc}(t, t_0) \cdot \varphi_T^{1,2} + \Delta\varphi_T$	
Hệ số từ biến cơ bản	$\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t_0)$	
	$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{(f_{cm28})^{0,7}}$	$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{(f_{cm28})^{0,64}}$
Hệ số từ biến khô	$\varphi_{dc}(t, t_0) = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t_0) \cdot \beta_{dc}(t, t_0)$	$\varphi_{dc}(t, t_0) = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t_0) \cdot \beta_{dc}(t, t_0) \cdot \beta_{dc}(w/cm)$
	$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{(f_{cm28})^{1,4}}$	$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{420}{(f_{cm28})^{1,25}}$
		$\beta_{dc}(w/cm) = \left(\frac{w/cm}{0,4}\right)^2$

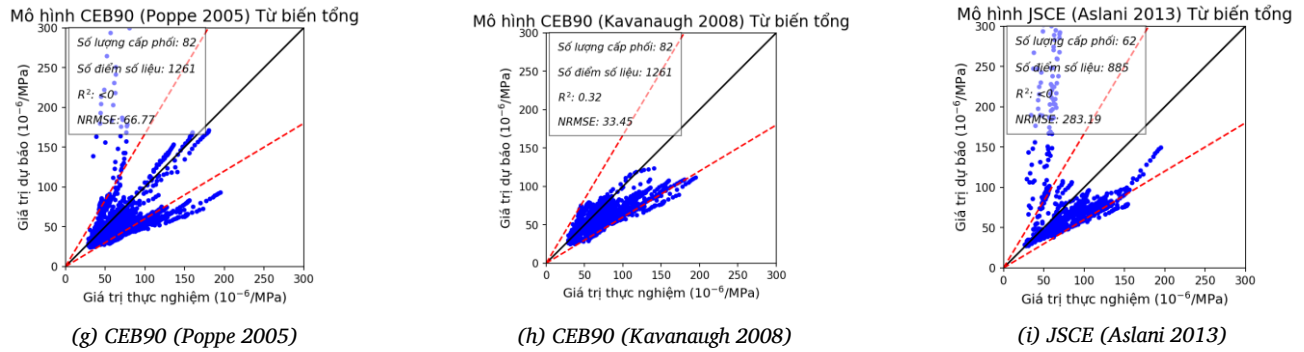
Bảng 3. Các thông số giới hạn của mô hình fib MC2010 và FIBSCC2024.

Thông số	fib MC2010	FIB-SCC2024	FIB-SCC2024
Loại xi măng	thường, rắn nhanh, rắn chậm	thường	thường
Cường độ nén 28 ngày	20 ÷ 130 MPa	25 ÷ 93 MPa	25 ÷ 93 MPa
Nhiệt độ môi trường	5 ÷ 30 °C	5 ÷ 30 °C	5 ÷ 30 °C
Độ ẩm môi trường	≥ 40 %	≥ 40 %	≥ 40 %
Tỷ lệ ứng suất/ cường độ	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$
Tro bay (% Chất kết dính)	-	≤ 60 %	≤ 60 %
Xi lò cao (% Chất kết dính)	-	≤ 45 %	≤ 45 %
Silica fume (% Chất kết dính)	-	≤ 10 %	≤ 10 %



Hình 5. So sánh mô hình FIB-SCC2024 và các mô hình khác đối với dự báo từ biến cơ bản.





Hình 6. So sánh mô hình FIB-SCC2024 và các mô hình khác đối với dự báo từ biến tổng.

6. Kết luận

Cơ sở dữ liệu từ biến của BTTL được thu thập, tổng hợp từ 168 đường cong của 32 tài liệu được công bố của nhiều quốc gia khác nhau. Trong đó, 33 đường cong là từ biến cơ bản và 135 đường cong là từ biến tổng. Dựa vào cơ sở dữ liệu này, mô hình dự báo từ biến của BTTL FIB-SCC2024 đã được xây dựng trên cơ sở điều chỉnh từ mô hình fib MC2010 với độ chính xác được cải thiện đáng kể: hệ số tương quan R^2 được cải thiện từ 0,07 lên đến 0,62, sai số căn quân phương tiêu chuẩn NRMSE được giảm từ 38,98 % xuống còn 24,95 % (giảm ≈ 36 %). Mô hình FIB-SCC2024 có độ chính xác cao hơn đáng kể so với một số mô hình hiện hành khi dự báo từ biến của BTTL, có tiềm năng áp dụng trong tính toán thiết kế các kết cấu sử dụng BTTL. Tuy nhiên, cần liên tục mở rộng cơ sở dữ liệu để cải thiện hơn nữa độ chính xác cũng như giới hạn của mô hình.

Tài liệu tham khảo

- [1]. T. M. Đứơc, "Từ biến của bê tông hạt mịn," (in Vietnamese), *Tạp chí KHCN Xây dựng*, vol. 4, pp. 1-3, 2011.
- [2]. TCVN 12209:2018. *Bê tông tự lèn - Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử*.
- [3]. A.-M. Poppe and G. De Schutter, "Creep and shrinkage of self-compacting concrete," in *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*, China, 2005, pp. 329-336.
- [4]. B. P. Kavanaugh, "Creep Behavior of Self-Consolidating Concrete," Master Thesis, Auburn University, Alabama, 2008.
- [5]. F. Aslani and L. Maia, "Creep and shrinkage of high-strength self-compacting concrete: experimental and analytical analysis," (in English), *Magazine of Concrete Research*, vol. 65, no. 17, pp. 1044-1058, 2013.
- [6]. N. D. Binh, "Prediction Model for Shrinkage and Creep Behavior of Self-Compacting Concrete," Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, 2023.
- [7]. Z. P. Bažant, M. Jirasek, M. H. Hubler, and I. Carol, "RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis. Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability," (in English), *Materials and structures*, vol. 48, no. 4, pp. 753-770, 2015.
- [8]. ASTM C150/C150M - 12 (2012). *Standard Specification for Portland Cement*.
- [9]. fib MC2010 (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*.
- [10]. EN 197-1:2011 (2011). *Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*.
- [11]. ACI 209R-92 (1992). *Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures*.
- [12]. CEB-FIB (1970). *International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures, Principles and Recommendations*.
- [13]. CEB-FIB (1978). *Comité Euro-International du Béton - Federation Internationale De La Precontrainte, International System of Unified Standard Codes of Practice for Structures, Volume II - CEB-FIP Model Code for Concrete Structures*.
- [14]. CEB-FIB model code 1990: *Design code*, 1993.
- [15]. M. Wicke, E. Siviero, H. Hilsdorf, H. S. Müller, J. Walraven, and P. Foraboschi, "Structural concrete. Textbook on behaviour, design and performance. Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990. Volume 1: Introduction-Design process-Materials," (in English), *Bulletin-FIB*, vol. 1, no. 1, 1999.
- [16]. JSCE (2007). *Standard specification for concrete structures "Design"*.
- [17]. Z. P. Bazant and W. P. Murphy, "Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3," (in English), *Matériaux et constructions*, vol. 28, no. 180, pp. 357-365, 1995.