

# Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo để dự đoán ứng xử bê tông trong thí nghiệm nén một trục

Research on application of the artificial neural network to prediction behaviour of concrete subjected to uniaxial compression

> **TRẦN VĂN TIẾNG<sup>1</sup>, LÊ ÍCH TRỌNG<sup>2</sup>**

Điện thoại: 0906. 792. 527 Email: [tiengtv@hcmute.edu.vn](mailto:tiengtv@hcmute.edu.vn)

<sup>1,2</sup> Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

## TÓM TẮT

Việc phân tích, đánh giá và dự đoán các ứng xử nén của bê tông bằng phương pháp giải tích, mô phỏng số là một trong những điều cần thiết và quan trọng trong việc giảm thiểu nén thực nghiệm lên bê tông, giảm chi phí thí nghiệm và lượng bê tông thải ra môi trường. Từ các nghiên cứu của nhiều tác giả qua các năm đã đề xuất các mô hình ứng xử như Hognestad, CEB-FIP, Wee & Mansur, Almusallam... Tuy nhiên, các mô hình ứng xử theo phương pháp giải tích trên cho đường cong ứng xử quan hệ ứng suất – biến dạng chưa thực sự bám sát đường ứng xử thực nghiệm. Bài báo đề xuất sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để dự đoán cường độ chịu nén của bê tông từ các thành phần cấp phối khác nhau thông qua bộ dữ liệu nén mẫu thực nghiệm. Giá trị cường độ ghi nhận sau quá trình xấp xỉ sẽ làm thông số đầu vào cho hàm mục tiêu LIT được bài báo đề xuất. Giải thuật tiến hóa di truyền (GA) được ứng dụng để tìm kiếm các hệ số tối ưu nhằm tối ưu hóa hàm ứng xử LIT, để đưa ra mô hình ứng xử cuối cùng. Nhằm đảm bảo đường cong dự đoán sau quá trình tối ưu là tin cậy, bài báo tiến hành đối chiếu kết quả dự đoán với 3 tổ mẫu thí nghiệm cho ra quan hệ ứng suất và biến dạng. Từ kết quả ghi nhận, đường cong ứng xử sau tối ưu đã bám sát đường ứng xử thử nghiệm với sai số thấp. Từ đó, hàm ứng xử được đề xuất đạt độ tin cậy cao.

**Từ khóa:** Thí nghiệm nén mẫu bê tông, mô hình ứng xử, giải thuật di truyền, mạng nơ-ron nhân tạo, tối ưu hóa mô hình ứng xử.

## ABSTRACT

Analysis, evaluation and prediction of compression behavior of concrete by analytical methods, numerical simulation is one of the essential and important things in minimizing experimental compression on concrete, reducing testing costs and the amount of concrete discharged into the environment. From the researches of many authors over the years have suggested behavioral models such as Hognestad, CEB-FIP, Wee & Mansur, Almusallam... However, above for the behavior curve of stress – strain relationship has not really followed the experimental behavior line. The study proposes to use artificial neural network (ANN) to predict compressive strength of concrete from different aggregate components through data set of 55 experimental compression samples. The compressives value recorded after the approximation process will be the input parameter for the proposed LIT target function. The genetic evolution algorithm (GA) is applied to find the optimal coefficients to optimize the LIT behavior function, to provide the final proposed behavioral model. In order to ensure that the prediction curve is reliable after the optimal process, the study compares the prediction results with 3 experimental sample groups to stress and strain relationships. From the recorded results, the postoptimal behavioral curve closely followed the test behavior curve with low error. From there, the proposed behavior function is highly reliable.

**Keywords:** Uniaxial compression, behaviour model, genetic algorithms, artificial neural network, behaviour model optimization.

## 1. Giới thiệu

Hiện nay, với sự phát triển mạnh mẽ của hạ tầng đô thị các dân cư, trung tâm thương mại... Vật liệu xây dựng chủ yếu cho các công trình là bê tông và bê tông cốt thép. Để đánh giá chất lượng bê tông sử dụng, mỗi xe cung cấp bê tông đều phải được lấy mẫu thực nghiệm. Do đó, lượng mẫu bê tông cần phải được thí nghiệm rất nhiều, dẫn đến tiến độ, chi phí và lượng bê tông thải ra làm ô nhiễm, mất mỹ quan đô thị là rất lớn.

Với thời đại kỹ thuật số 4.0, trí tuệ nhân tạo được biết đến như một công cụ mạnh mẽ nhằm giải quyết các bài toán với khối lượng lớn, với tính nhanh chóng, chính xác và dự đoán cao.

Từ thực tế đó, bài báo ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANNs) để dự đoán giá trị cường độ chịu nén của bê tông với giá trị đầu vào là các thành phần cấp phối từ 55 bộ mẫu thí nghiệm thực nghiệm [1].

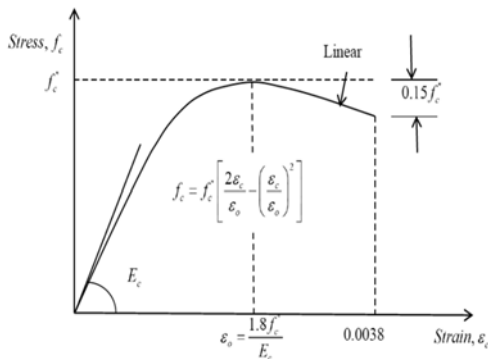
Qua tính toán giải tích các mô hình ứng xử theo nhiều tác giả đề xuất như Hognestad, CEB-FIP, Wee & Mansur, Almusallam & Alsayed... nhận thấy có sự sai lệch lớn về đường cong ứng xử thu được so với kết quả từ thí nghiệm thực nghiệm. Bài báo tiến hành để xuất mô hình ứng xử LIT kết hợp với giải thuật tiến hóa di truyền (GA) nhằm đưa ra dự đoán về đường cong quan hệ ứng suất và biến dạng. Với giá trị đầu vào của hàm mục tiêu là cường độ chịu nén đã được mạng ANN xấp xỉ, bài báo đã đưa ra dự đoán về mối quan hệ ứng suất-biến dạng phù hợp với bê tông có cấp cường độ thường ( $\leq 50 \text{ MPa}$ ). Kết quả dự đoán được kiểm chứng với 3 bộ mẫu thí nghiệm DC01, DC02 tại [2] và TR03 tại [3]. Từ kết quả ghi nhận, đường cong ứng xử sau tối ưu đã bám sát đường ứng xử thực nghiệm với sai số thấp. Vì vậy, hàm ứng xử được đề xuất đạt độ tin cậy cao.

## 2. Xây dựng hàm mục tiêu ứng xử

Các mô hình ứng xử theo Hognestad, CEB - FIP, Wee & Mansur và Almusallam & Alsayed với giá trị đầu vào là cường độ chịu nén có thể xây dựng nên đường cong ứng xử và các thông số đầu ra như biến dạng lớn nhất và mô đun đàn hồi. Bài báo thực hiện tính toán giải tích các mô hình ứng xử trên, đánh giá các giá trị đầu ra, dạng đường cong ứng xử. Nhận thấy có sự sai lệch tương đối lớn từ các hàm giải tích cho trước, vì vậy hàm ứng xử LIT đề xuất được phát triển từ phương trình của Wee & Mansur và kết hợp với giải thuật tiến hóa di truyền (GA), nhằm tối ưu hóa kết quả đầu ra.

Giá trị cường độ chịu nén của 2 tổ mẫu DC01, DC02 được ghi nhận làm thông số đầu vào tính toán [2].

### Tính toán giải tích ứng xử theo Hognestad [4]



Hình 1. Mô hình Hognestad cho quan hệ ứng xử

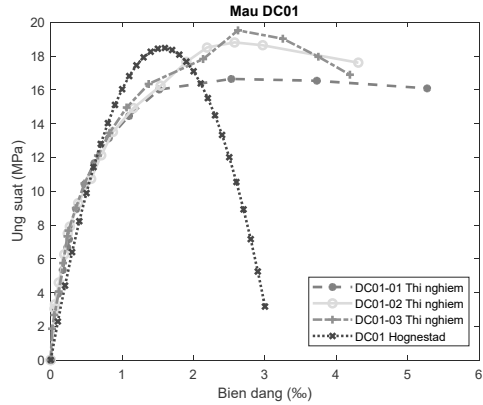
$$\text{Quan hệ ứng xử Hognestad: } \sigma_{ci} = f'_{co} \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{co}} \right) - \left( \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\text{Trong đó: } \varepsilon_{co} = \frac{1,8f'_{co}}{E_c} : \text{biến dạng lớn nhất} \quad (2)$$

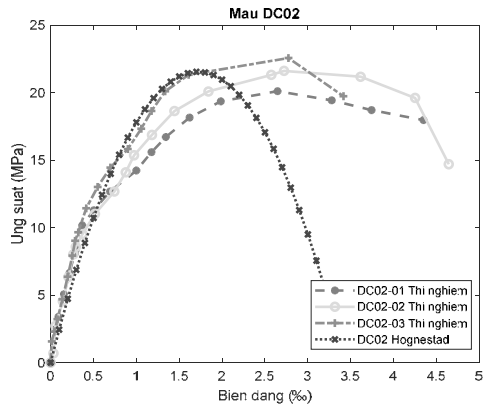
$$E_c = 12,680 + 460f'_{co} : \text{mô đun đàn hồi} \quad (3)$$

Bảng 1. Biến dạng lớn nhất và mô đun đàn hồi theo Hognestad

Tổ mẫu	$f'_{co}$ (MPa)	$\varepsilon_{co}$ (‰)	$E_c$ (GPa)
DC01	18,482	1,571	21,182
DC02	21,543	1,717	22,590

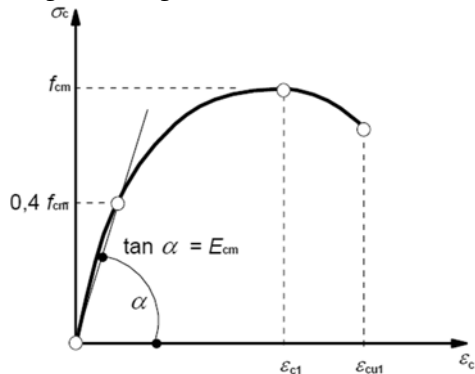


Hình 2. Quan hệ ứng xử DC01 thực nghiệm & Hognestad



Hình 3. Quan hệ ứng xử DC02 thực nghiệm & Hognestad

### Tính toán giải tích ứng xử theo CEB-FIP [5]



Hình 4. Mô hình CEB-FIP quan hệ ứng suất - biến dạng

$$\text{Quan hệ ứng xử CEB-FIP: } \sigma_{ci} = f'_{co} \left[ \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \right] \quad (4)$$

$$\text{Trong đó: } \eta = \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{co}} : \text{tỷ số giữa biến dạng} \quad (5)$$

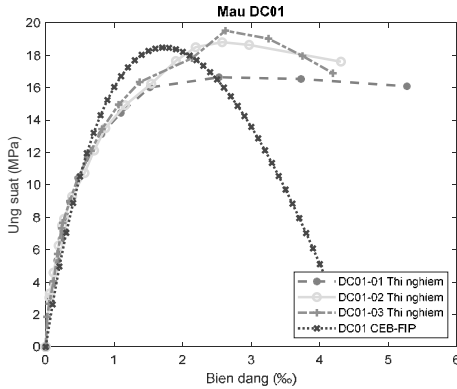
$$k = 1,05 \frac{E_c \varepsilon_{co}}{f'_{co}} : \text{tỷ số mô đun đàn hồi} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{co} = 0,7 f'_{co}{}^{0,31} : \text{biến dạng lớn nhất tại đỉnh đường cong} \quad (7)$$

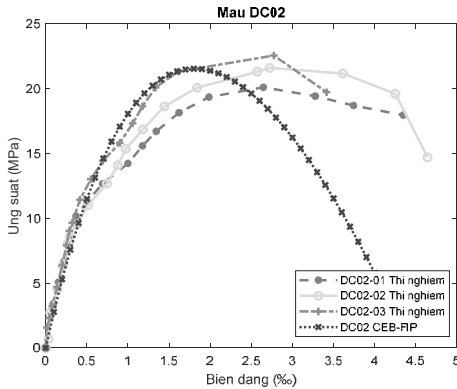
$$E_c = 22 \times \left( \frac{f'_{co}}{10} \right)^{0,3} : \text{mô đun đàn hồi} \quad (8)$$

**Bảng 2.** Biến dạng lớn nhất và mô đun đàn hồi theo CEB-FIP

Tổ mẫu	$f'_{co}$ (MPa)	$k$	$\epsilon_{co}$ (%)	$E_c$ (GPa)
DC01	18,482	2,598	1,729	26,451
DC02	21,543	2,448	1,813	27,696

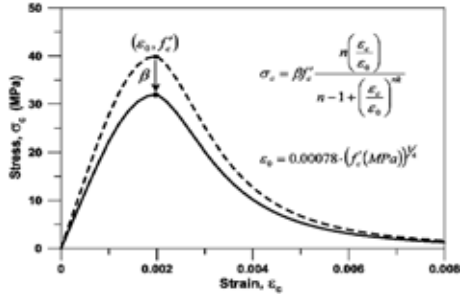


**Hình 5.** Quan hệ ứng xử\_DCO1 thực nghiệm & CEB-FIP



**Hình 6.** Quan hệ ứng xử\_DCO2 thực nghiệm & CEB-FIP

**Tính toán giải tích ứng xử theo Wee & Mansur [6]**



**Hình 7.** Mô hình Wee & Mansur ứng suất - biến dạng

Quan hệ ứng xử Wee & Mansur: 
$$\sigma_{ci} = f'_{co} \left[ \frac{k_1 \beta \left( \frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_{co}} \right)}{k_1 \beta - 1 + \left( \frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_{co}} \right)^{k_2 \beta}} \right] \quad (9)$$

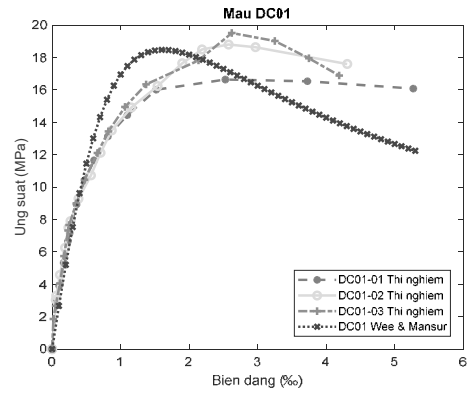
Trong đó:  $k_1 = \left( \frac{50}{f'_{co}} \right)^3$ ;  $k_2 = \left( \frac{50}{f'_{co}} \right)^{1.3}$ ;  $k_1 = k_2 = 1$ ;  $f'_{co} \leq 50$  MPa

$\epsilon_{co} = 0.00078 (f'_{co})^{1/4}$  : biến dạng lớn nhất (10)

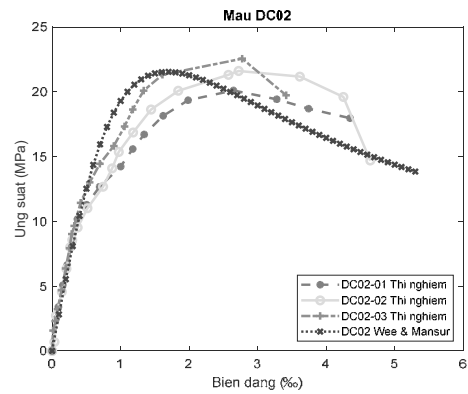
$E_c = 10.2 \times (f'_{co})^{1/3}$  : mô đun đàn hồi (11)

**Bảng 3.** Biến dạng lớn nhất và mô đun đàn hồi Wee & Mansur

Tổ mẫu	$f'_{co}$ (MPa)	$\beta$	$\epsilon_{co}$ (%)	$E_c$ (GPa)
DC01	18,482	1,735	1,617	26,968
DC02	21,543	1,824	1,680	28,381

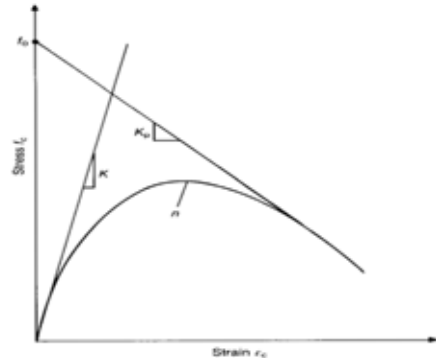


**Hình 8.** Quan hệ ứng xử\_DCO1 thực nghiệm & Wee Mansur



**Hình 9.** Quan hệ ứng xử\_DCO2 thực nghiệm & Wee Mansur

**Tính toán giải tích ứng xử theo Almusallam & Alsayed [7]**



**Hình 10.** Mô hình Almusallam & Alsayed ứng suất - biến dạng

Quan hệ ứng xử Almusallam & Alsayed:

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \epsilon_c}{\left( 1 + \left[ \frac{(E_1 - E_2) \epsilon_c}{f'_o} \right]^n \right)^{1/n}} + E_2 \epsilon_c \quad (12)$$

$$n = \frac{-\ln(2)}{\ln(f'_1 / f'_o - E_2 / (E_1 - E_2))}$$
 : phương trình đường cong (13)

$$f'_1 = f'_{co} \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{co}} \right) - \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right]$$
 : cường độ  $f'_1$  (14)

$$\epsilon_1 = \frac{f'_o}{E_1 - E_2}$$
 : biến dạng  $\epsilon_1$  (15)

$$f'_o = 5.6 + 10.2 f'_{co} - E_2 \epsilon_o$$
 (16)

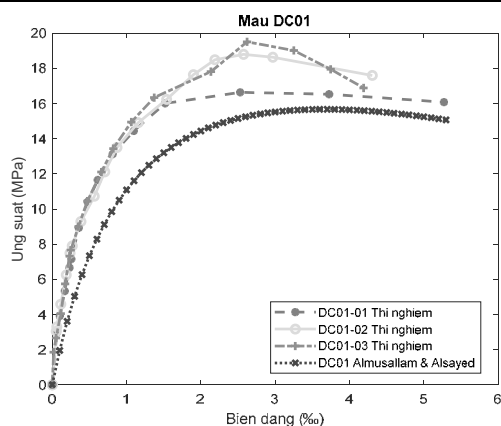
$$\epsilon_{co} = (0.398 f'_{co} + 18.174) \times 10^{-4}$$
 : biến dạng lớn nhất (17)

$$E_2 = 5470 - 375 f'_{co}$$
 với  $f'_{co} \leq 55$  MPa (18)

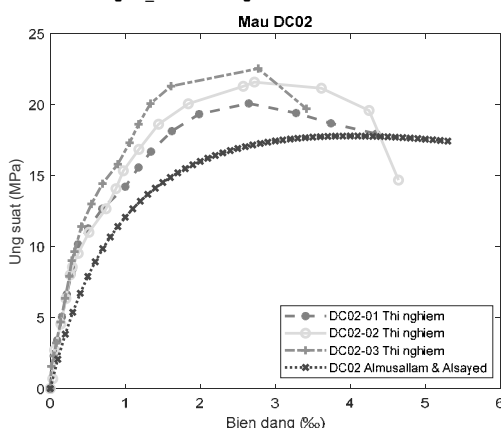
$$E_c = E_1 = 3320 \sqrt{f'_{co}} + 6900$$
 : mô đun đàn hồi (19)

**Bảng 4.** Biến dạng lớn nhất và mô đun đàn hồi theo Almusallam

Tổ mẫu	$f'_{co}$ (MPa)	$\epsilon_1$	$f_i$	n	$\epsilon_{co}$ (%)	$E_1 = E_c$ (GPa)
DC01	18,482	1,3	13,6	1,2	2,55	21,173
DC02	21,543	1,4	16,5	1,3	2,67	22,310

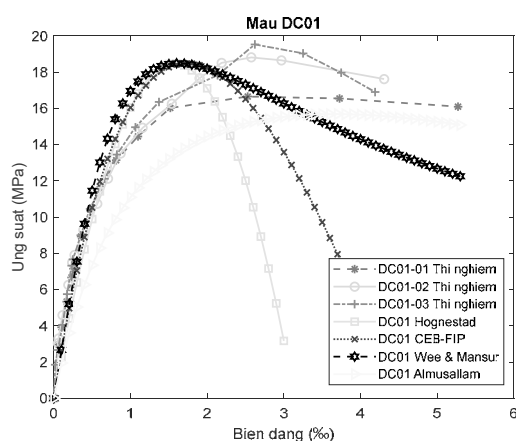


**Hình 11.** Quan hệ ứng xử\_DCO1 thực nghiệm & Almusallam

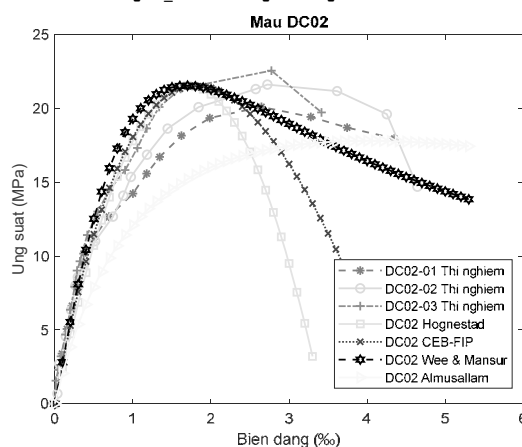


**Hình 12.** Quan hệ ứng xử\_DCO2 thực nghiệm & Almusallam

**Đánh giá phương pháp thực nghiệm và tính toán giải tích**



**Hình 13.** Quan hệ ứng xử\_DCO1 thực nghiệm & giải tích



**Hình 14.** Quan hệ ứng xử\_DCO2 thực nghiệm & giải tích

Nhận thấy, mô hình ứng xử theo Almusallam & Alsayed cho kết quả tính toán giải tích với thông số biến dạng lớn nhất gần với kết quả thực nghiệm. Với sai số mẫu DC01 và DC02 tương ứng là 0,022 và 0,039.

Dựa vào đường cong quan hệ ứng xử hình 13 và 14, nhìn chung các mô hình ứng xử tính toán giải tích cho dạng đường cong giống với đường cong ứng xử thực nghiệm ở 1/3 giai đoạn đầu. Mô hình ứng xử theo Hognestad và CEB-FIP cho dạng biểu đồ sau đỉnh biến dạng có dạng gãy khúc và sai lệch lớn. Phương trình ứng xử theo Wee & Mansur cho dạng biểu đồ trước và sau đỉnh biến dạng khá tương đồng với kết quả thực nghiệm.

**Mô hình ứng xử LIT đề xuất**

Bài báo đề xuất mô hình ứng xử LIT, kết hợp giữa phương trình ứng xử theo Wee & Mansur và hàm biến dạng lớn nhất từ Almusallam & Alsayed. Phương trình và các điều kiện ràng buộc có dạng:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{LIT_{ci}} = f'_{co} \left[ \frac{\beta \frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_{co}}}{\beta - 1 + \left( \frac{\epsilon_{ci}}{\epsilon_{co}} \right)^\beta} \right]; E_c = 10,2 \times (f'_{co})^{1/3}; \epsilon_{co} = (0,398 f'_{co} + 18,174) \times 10^{-4}; \beta = \frac{1}{1 - \frac{f'_{co}}{\epsilon_{co} E_c}} \\ 0 \leq \sigma_{LIT_{ci}} \leq f'_{co} \\ 0 \leq \epsilon_{ci} \leq \epsilon_{co} \\ f'_{co} \leq 50 \text{ MPa} \end{array} \right. \quad (20)$$

Thay  $E_c$ ;  $\epsilon_{co}$ ;  $\beta$  vào phương trình  $\sigma_{ci}$  ta được:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{LIT\_ci} &= \frac{510\varepsilon_{ci}f'_{co}}{\left[ 51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3} \right] \left[ \frac{50f'_{co}{}^{2/3}}{51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3}} + \left( \frac{10\varepsilon_{ci}}{0,398f'_{co} + 18,174} \right)^{\frac{51(0,398f'_{co} + 18,174)}{51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3}}} \right]} \\ 0 &\leq \sigma_{LIT\_ci} \leq f'_{co} \\ 0 &\leq \varepsilon_{ci} \leq \varepsilon_{co} \\ f'_{co} &\leq 50 \text{ MPa} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

**Hàm mục tiêu tối ưu đề xuất**

Mô hình ứng xử LIT có giá trị đường cong thay đổi vào tỷ số giữa biến dạng tương ứng  $\varepsilon_{ci}$  và biến dạng lớn nhất  $\varepsilon_{co}$ , hệ số nhánh  $\beta$  giữa mô đun tiếp tuyến và mô đun cát tuyến của đường cong. Bài báo đề xuất đặt các biến và tìm kiếm thông số  $\alpha_1$  phụ thuộc vào tỷ số biến dạng và  $\alpha_2$  phụ thuộc vào tỷ số hệ số nhánh như sau:

$$\sigma_{GA\_ci} = f'_{co} \left[ \frac{(\alpha_1 \varepsilon_{ci} / \varepsilon_{co}) \beta \alpha_2}{\beta \alpha_2 - 1 + (\alpha_1 \varepsilon_{ci} / \varepsilon_{co})^{\beta \alpha_2}} \right] \quad (21)$$

$$\sigma_{GA\_ci} = \frac{510\varepsilon_{ci}f'_{co}\alpha_1\alpha_2}{\left[ 51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3} \right] \left[ \frac{51(0,398f'_{co} + 18,174)(\alpha_1 - 1) - 50f'_{co}{}^{2/3}}{51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3}} + \left( \frac{10\varepsilon_{ci}\alpha_1}{0,398f'_{co} + 18,174} \right)^{\frac{51(0,398f'_{co} + 18,174)\alpha_2}{51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3}}} \right]} \quad (21)$$

Hàm ứng xử tối ưu (hàm thích nghi quần thể):  $fval = \min \left( \sum_{i=0}^n \Delta \sigma_{ci} \right) = \min \left( \sum_{i=0}^n \left| \sigma_{LIT\_ci} - \sigma_{GA\_ci} \right| \right)$  (22)

$$fval_{ci} = \left| \sigma_{LIT\_ci} - \frac{510\varepsilon_{ci}f'_{co}\alpha_1\alpha_2}{\left[ 51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3} \right] \left[ \frac{51(0,398f'_{co} + 18,174)(\alpha_1 - 1) - 50f'_{co}{}^{2/3}}{51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3}} + \left( \frac{10\varepsilon_{ci}\alpha_1}{0,398f'_{co} + 18,174} \right)^{\frac{51(0,398f'_{co} + 18,174)\alpha_2}{51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3}}} \right]} \right| \quad (23)$$

$$fval = \min \left( \sum_{i=0}^n \left| \sigma_{LIT\_ci} - \frac{510\varepsilon_{ci}f'_{co}\alpha_1\alpha_2}{\left[ 51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3} \right] \left[ \frac{51(0,398f'_{co} + 18,174)(\alpha_1 - 1) - 50f'_{co}{}^{2/3}}{51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3}} + \left( \frac{10\varepsilon_{ci}\alpha_1}{0,398f'_{co} + 18,174} \right)^{\frac{51(0,398f'_{co} + 18,174)\alpha_2}{51(0,398f'_{co} + 18,174) - 50f'_{co}{}^{2/3}}} \right]} \right| \right) \quad (22)$$

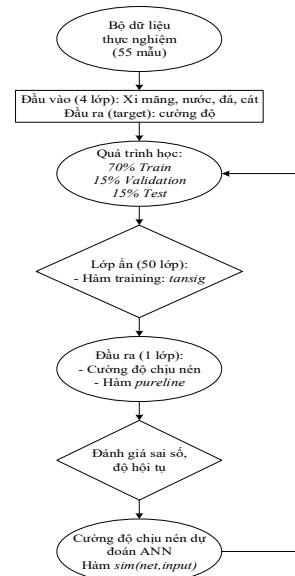
**3. Dự đoán cường độ chịu nén**

Bài báo ghi nhận bộ dữ liệu nén mẫu thực nghiệm gồm 55 mẫu từ [1], tiến hành ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo ANN nhằm xây dựng mối quan hệ giữa cấp phối đầu vào và cường độ chịu nén làm đầu ra từ mạng. Mô hình mạng được xây dựng gồm 4 lớp đầu vào tương ứng với 4 thành phần cấp phối của bê tông và 1 lớp đầu ra của mạng là giá trị cường độ chịu nén mong muốn.

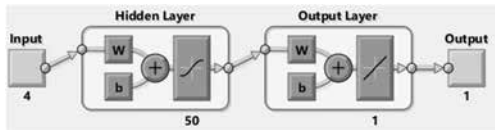
Trong quá trình học máy, với bộ dữ liệu 55 mẫu ghi nhận, bài báo đề xuất sử dụng 70% "Train" (39 mẫu), 15% Validation (8 mẫu), 15% Test (8 mẫu). Các tổ mẫu được chọn ngẫu nhiên và không theo thứ tự.

Bài toán được xây dựng với lớp ẩn giả định gồm 50 lớp, lớp ẩn sẽ được thay đổi qua nhiều lần khảo sát để tìm ra điểm hội tụ và giá trị sai số tối ưu. Lớp ẩn sẽ được huấn luyện bằng hàm "tansig" và lớp đầu ra thực hiện bằng hàm "pureline".

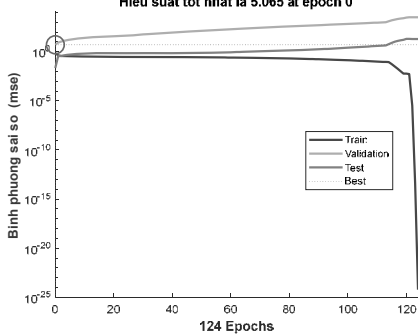
Kết quả được đánh giá dựa trên giá trị hồi quy R, đo lường mối quan hệ giữa đầu ra thu được và giá trị mong muốn.



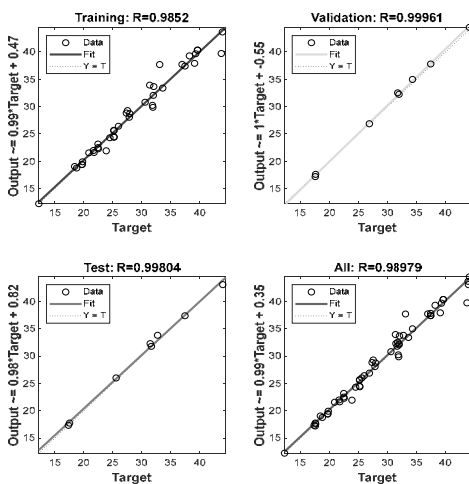
**Lưu đồ 1.** Dự đoán cường độ chịu nén từ thành phần cấp phối



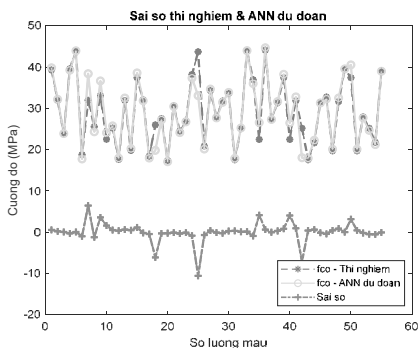
Lưu đồ 2. Sơ đồ mạng ANN dự đoán cường độ chịu nén



Hình 15. Biểu đồ biểu diễn sự hội tụ trong quá trình huấn luyện



Hình 16. Giá trị đo lường mối tương quan đầu ra và mục tiêu



Hình 17. Biểu đồ sai số giữa thực nghiệm và ANN dự đoán

Nhận thấy, quá trình đào tạo được kết thúc sau 124 lần lặp với giá trị hiệu suất tốt nhất ghi nhận là 5,065.

Hình 16, thể hiện giá trị hồi quy R, là giá trị đo lường mối quan hệ giữa đầu ra và mục tiêu mong muốn. Với giá trị  $R=1$  thể hiện được mối quan hệ chặt chẽ với sai số thấp, và  $R=0$  thể hiện mối quan hệ rời rạc với sai số đầu ra lớn. Kết quả sau quá trình huấn luyện với  $R=0,98979$  thể hiện độ tin cậy đối với dữ liệu đầu ra. Hình 17, biểu diễn sai số giữa cường độ đầu ra của dữ liệu thực nghiệm và mạng ANN dự đoán. Giá trị sai số ghi nhận tương đối nhỏ và nằm trong giới hạn cho phép.

**Kết luận:** Từ mạng nơ-ron ANN được xây dựng, có thể dự đoán giá trị cường độ chịu nén của bê tông với 1 cấp phối bất kỳ, từ đầu vào là các thành phần cấp phối, mạng nơ-ron nhân tạo ANN sẽ tìm và xấp xỉ phi tuyến dựa trên mối quan hệ đã xây dựng từ tập mẫu để cho ra cường độ chịu nén. Kết quả ghi nhận thể hiện tính chính xác và ứng dụng cao.

#### 4. Dự đoán đường cong ứng xử

Bài báo dự đoán đường cong ứng xử 3 mẫu nén M1, M2, M3 với cường độ khác nhau trong bộ 55 mẫu nén, nhằm đánh giá hình dạng đường cong giữa mô hình ứng xử LIT đã đề xuất kết hợp giải thuật di truyền GA và các mô hình tính toán giải tích khác.

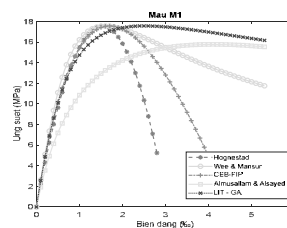
Để kiểm chứng kết quả dự đoán là tin cậy, bài báo tiến hành đối chiếu kết quả dự đoán với 3 tổ mẫu thí nghiệm thực nghiệm được ghi nhận gồm DC01, DC02 tại [2] và TR03 tại [3].

Bảng 5. Thông số tối ưu và giá trị hàm thích nghi tìm kiếm

Thông số	$f'_{co}$ (MPa)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$fval_{best}$	$fval_{mean}$
Mẫu 1	17,576	0,635	0,794	0,012	1,719
Mẫu 2	30,571	0,604	0,698	0,206	4,121
Mẫu 3	44,092	0,562	0,595	0,193	6,536

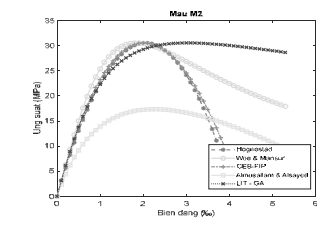
Từ hàm thích nghi (22), tiến hành khởi tạo quần thể với 1500 lần tìm kiếm, sau quá trình lai tạo, đột biến... hệ số tối ưu  $\alpha_1$ ;  $\alpha_2$  và giá trị hàm thích nghi được ghi nhận tại bảng 5.

Mẫu 1



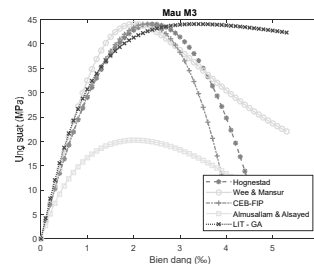
Hình 18. Quan hệ ứng xử mẫu M1 giữa LIT & GA và giải tích

Mẫu 2



Hình 19. Quan hệ ứng xử mẫu M2 giữa LIT & GA và giải tích

Mẫu 3



Hình 20. Quan hệ ứng xử mẫu M3 giữa LIT & GA và giải tích

Qua quá trình khảo sát 3 mẫu bê tông có cường độ khác nhau với sự chênh lệch tương đối về thành phần cấp phối, nhận thấy sau quá trình tối ưu mô hình ứng xử để xuất LIT đã cho được hình dạng đường cong phù hợp với dạng đường cong của bê tông có cấp cường độ thường qua các miền ứng xử. Để xác thực độ tin cậy từ hàm ứng xử tối ưu đã đề xuất, bài báo tiến hành đối chiếu với các mẫu thử thực nghiệm có gắn thiết bị đo quan hệ ứng suất và biến dạng (LVDTs).

#### Thí nghiệm nén mẫu thực nghiệm

Các mẫu bê tông được thực hiện với thành phần cốt liệu tại bảng 6, sử dụng xi măng Holcim PCB40, cốt liệu mịn (cát), cốt liệu thô (đá), sử dụng nước tinh khiết và các tiêu chí kỹ thuật theo TCVN 4506-2012. Mẫu bê tông được thí nghiệm có dạng hình trụ, kích thước 150x300 (mm), được thí nghiệm nén mẫu theo tiêu chuẩn ASTM C469.

**Bảng 6.** Tỷ lệ cốt liệu trong thực nghiệm của tổ mẫu (kg/m<sup>3</sup>)

Mẫu	Xi măng	Cốt liệu mịn	Cốt liệu thô	Nước
DC01	385	668	1182	201
DC02	437	625	1170	201
TR03	400	660	1310	200

**Dự đoán cường độ chịu nén từ tổ mẫu thí nghiệm**

Với mô hình mạng được xây dựng có tên là: *network1*

Giá trị đầu vào cho mẫu DC01:

$Input\_Exp\_DC01 = [385\ 201\ 1182\ 668]$

Giá trị đầu vào cho mẫu DC02:

$Input\_Exp\_DC02 = [437\ 201\ 1170\ 625]$

Giá trị đầu vào cho mẫu TR03:

$Input\_Exp\_TR03 = [400\ 200\ 1310\ 660]$

Giá trị đầu ra cho mẫu DC01:

$Output\_ANN\_DC01 = sim(network1, Input\_Exp\_DC01) = 18,482$

Giá trị đầu ra cho mẫu DC02:

$Output\_ANN\_DC02 = sim(network1, Input\_Exp\_DC02) = 21,543$

Giá trị đầu ra cho mẫu TR03:

$Output\_ANN\_TR03 = sim(network1, Input\_Exp\_TR03) = 32,271$

**Bảng 7.** Cường độ chịu nén giữa thực nghiệm và ANN dự đoán

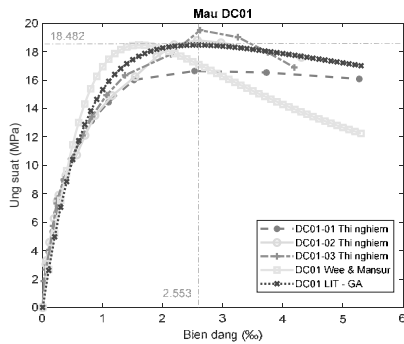
$f'_{co}$ (MPa)	DC01	DC02	TR03
Thực nghiệm	18,33	21,43	32,33
ANN dự đoán	18,482	21,543	32,271
Sai số	0,152	0,113	0,059

Giá trị cường độ chịu nén được dự đoán từ mạng nơ-ron nhân tạo ANN và kết quả nén mẫu thực nghiệm có sai số rất nhỏ. Vậy nên kết quả dự đoán cho giá trị với độ tin cậy cao.

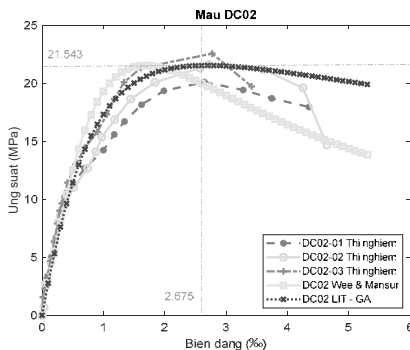
**Dự đoán đường cong ứng xử từ tổ mẫu thí nghiệm**

**Bảng 8.** Giá trị thông số tối ưu của các tổ mẫu qua tìm kiếm

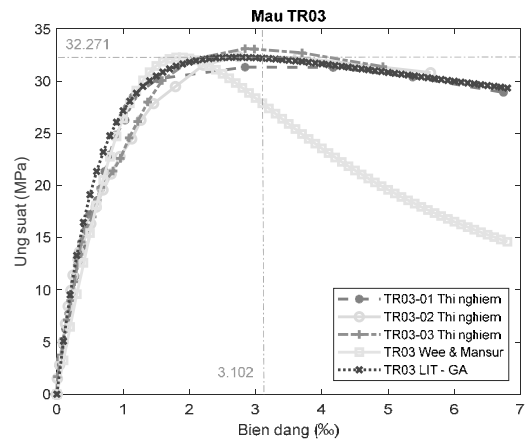
Hệ số $\alpha_1$			Hệ số $\alpha_2$		
DC01	DC02	TR03	DC01	DC02	TR03
0,633	0,628	0,599	0,788	0,765	0,685



**Hình 21.** Quan hệ ứng xử  $_{DC01}$  thực nghiệm & LIT - GA



**Hình 22.** Quan hệ ứng xử  $_{DC02}$  thực nghiệm & LIT - GA



**Hình 23.** Quan hệ ứng xử  $_{TR03}$  thực nghiệm & LIT - GA

**Nhận xét:** Thay các giá trị cường độ và hệ số tối ưu tương ứng của các tổ mẫu vào hàm ứng xử (21), tăng dần đều giá trị biến dạng để thu được giá trị ứng suất tương ứng.

Dựa vào dạng đường cong ứng xử hình 21, 22 và 23, nhận thấy đường cong đề xuất có hình dạng sau tối ưu đã bám sát đường cong thực nghiệm ở cả các giai đoạn gồm: từ giai đoạn ban đầu đến giai đoạn tuyến tính, phát triển lên giai đoạn phi tuyến và sau khi ứng suất đạt trạng thái cực hạn dẫn đến sự xuất hiện của vết nứt và phá hủy mẫu.

**5. Kết luận**

Việc ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo ANN dự đoán giá trị cường độ chịu nén từ các thành phần cấp phối đã cho kết quả xấp xỉ có độ sai số nhỏ so với kết quả từ thí nghiệm thực nghiệm.

Với mô hình ứng xử LIT được đề xuất, việc ứng dụng giải thuật tiến hóa di truyền GA nhằm tìm kiếm hàm ứng xử tối ưu từ mô hình giải tích cho trước, bằng cách đặt vào mô hình này các hệ số tối ưu và đánh giá tổng sai số toàn miền. Kết quả thu được là đáng tin cậy, thể hiện ở dạng đường cong sau tối ưu đã bám sát đường cong thực nghiệm khi được kiểm chứng qua 3 mẫu thử.

Từ kết quả ghi nhận, với 1 cặp phối bê tông bất kỳ có thể dự đoán ra được giá trị cường độ, biến dạng lớn nhất, mô đun đàn hồi và dạng đường cong với sai số nhỏ nhất đạt độ tin cậy cao. Mà không cần phải nén nhiều mẫu bê tông với cấp phối liên quan, đem lại nhiều lợi ích về kinh tế và môi trường trong quá trình đánh giá, kiểm định.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1] <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/concrete+compressive+strength>.  
 [2] Trần Văn Tiếng, Nguyễn Thị Thúy Hằng, Nguyễn Xuân Khánh. *Ứng xử chịu nén của bê tông: nghiên cứu giữa thực nghiệm và mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử rời rạc*. Đại học Sư Phạm Kỹ thuật TP.HCM, 2018.  
 [3] <https://drive.google.com/file/d/1tpXRdrELQTNaslpV75xpm6I7lBptRerG/view?usp=sharing>  
 [4] Hognestad. *A study of combined bending and axial load in RC members*. University of Illinois, Eng. Bull. Ser. P.399, 1951.  
 [5] Thomas Telford. *Comité Euro-International du Béton-Fédération Internationale de la Précontrainte. CEB-FIP model code 1990: design code*, London, 1993.  
 [6] Wee, T. H. Chin, M. S. Mansur. Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 70-76, 1996.  
 [7] T. H. Almusallam and S. H. Alsayed. Stress-strain relationship of normal high-strength and lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, pp. 39-44, 1995.