

Sử dụng mô hình hồi quy phi tuyến bậc hai để tối ưu hoá các yếu tố ảnh hưởng đến cường độ và độ chảy xòe của bê tông tính năng cao

Vũ Chí Công*, Lê Văn Minh

Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOA

Bê tông thường (CVC)
Bê tông tính năng cao (HPC)
Cường độ chịu nén
Độ chảy xòe
Quy hoạch thực nghiệm
Cấp phối tối ưu

TÓM TẮT

Đối với bê tông thường (CVC), quy trình thiết kế cấp phối bê tông tương đối đơn giản, thông thường chỉ cần thử nghiệm một số cấp phối với tỷ lệ xi măng khác nhau, chi phí một đợt thí nghiệm là không đáng kể. Trong khi đó để thiết kế cấp phối bê tông tính năng cao (HPC), do phải xác định cấp phối sao cho thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật, trong đó quan trọng nhất với HPC là yêu cầu về cường độ chịu nén và độ chảy xòe. Hiện nay các cơ quan, doanh nghiệp, các nhà nghiên cứu thường phải tốn rất nhiều công sức, kinh phí để làm thí nghiệm và thử nghiệm hiện trường. Bài viết này, tác giả đã sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để tìm ra cấp phối tối ưu cho bê tông tính năng cao với mức bê tông thiết kế đã cho ban đầu, thỏa mãn yêu cầu về cường độ và độ chảy xòe mà số thí nghiệm phải làm là ít nhất. Kết quả này có thể dùng để tham khảo trong quy trình thiết kế cấp phối HPC nhằm giảm kinh phí làm thí nghiệm.

KEYWORDS

Conventional vibrated concrete (CVC)
High performance concrete (HPC)
Compressive strength
The spread
Experimental planning
Optimal mix

ABSTRACT

For conventional vibrated concrete (CVC), the concrete mix design process is relatively simple, usually required to test some of mixes with different cement ratios, the cost of one test is insignificant. Meanwhile, to design ultra-high performance concrete mix (HPC), it is necessary to determine the mix to meet technical requirements, of which the most important for HPC is the requirement for compressive strength and the spread. Currently, agencies, businesses, and researchers often have to spend a lot of effort and money to do experiments and practical tests. In this article, the author used the experimental planning method to find the optimal mix for initial ultra-high performance concrete for a given initial design concrete grades, meet the requirements of strength and spread with the least number of experiments. This result can be used for reference in the HPC mix design process to reduce experiment costs.

1. Giới thiệu

Việc xuất hiện vật liệu bê tông sau đó là bê tông cốt thép đã làm thay đổi, tạo nên cuộc cách mạng trong ngành xây dựng. Cùng với những tiến bộ của khoa học kỹ thuật cũng như sự tiến bộ trong lĩnh vực toán học, hóa học, vật lý, ngành vật liệu xây dựng có những đột phá lớn trong công nghệ chế tạo và thi công các loại vật liệu mới, làm nên những kỳ tích mới trong ngành xây dựng.

Trong vài thập kỷ gần đây, quy mô và tốc độ xây dựng đặc biệt là các công trình cầu đường, nhà cao tầng, nhà siêu cao tầng sử dụng các kết cấu vô móng, kết cấu có tuổi thọ cao, kết cấu thân thiện với môi trường ngày càng phát triển trên thế giới cũng như tại Việt Nam. Bê tông là loại vật liệu được sử dụng rất phổ biến với khối lượng lớn, chiếm khoảng 60% khối lượng các kết cấu công trình xây dựng. Theo kết quả khảo sát thì bê tông được sử dụng cho công trình ở nước ta hiện nay phổ biến vẫn là bê tông thường với cường độ nén 15-30MPa cho công trình thấp tầng và 30-50 MPa cho nhà cao tầng và các công trình cầu hầm lớn. Với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học hiện đại và xu

thế chung của thế giới đòi hỏi chất lượng cho bê tông trong công trình xây dựng ngày càng cần được nâng cao [1].

Tuy nhiên, thông thường nâng cao cường độ chịu nén cho bê tông thì khả năng chịu kéo, uốn khi bê tông biến dạng cũng tăng không đáng kể. Các loại bê tông thường, bê tông cường độ cao vẫn chưa đáp ứng hết được nhu cầu sử dụng trong các công trình xây dựng có yêu cầu kỹ thuật cao về kết cấu chịu lực. Bê tông chất lượng cao tiếng Anh là: High Performance Concrete – (HPC) là kết quả nghiên cứu của các nhà khoa học Hoa Kỳ, Nhật Bản và châu Âu những năm 70-80 của thế kỷ trước, trên cơ sở phát triển phụ gia siêu dẻo Polyme thế hệ mới, nên bê tông HPC chưa được biết tới nhiều nhưng lại có các đặc tính vượt trội về tính công tác, tính cơ học, độ bền cũng như cường độ tốt hơn so với bê tông thông thường và bê tông cường độ cao. Việc nghiên cứu bê tông HPC được diễn ra nhiều nơi trên thế giới cũng như tại Việt Nam. Tuy vậy các nghiên cứu và ứng dụng ở Việt Nam chưa nhiều, do đó việc nghiên cứu cường độ của bê tông HPC sử dụng cho kết cấu công trình ở Việt Nam là hướng đi khoa học tiên tiến và rất cấp thiết. Đây là loại vật liệu tiềm năng mang lại nhiều kết cấu sáng tạo cho ngành

*Liên hệ tác giả: congvc@huce.edu.vn

Nhận ngày 04/05/2023, sửa xong ngày 05/08/2023, chấp nhận đăng 12/08/2023

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2023.595>

xây dựng, độ bền vững cao, giảm thiểu ô nhiễm môi trường tác động của hiệu ứng biến đổi khí hậu [2-3].

Để sử dụng cho những bộ phận chịu lực lớn và phức tạp như tháp cầu dây văng hay khu vực lắp đặt các ụ neo cáp, mục tiêu cần nghiên cứu công nghệ chế tạo được bê tông HPC có cường độ cao (60MPa) và độ chảy xòe (từ 600mm) trở lên. Bê tông HPC được chế tạo bởi những thành phần vật liệu có chất lượng cao, cần được chọn lựa một cách cẩn thận và tối ưu hóa trong thiết kế. Bê tông tính năng cao có tỉ lệ nước / xi măng thấp, thường là từ 0,2 đến 0,45. Phụ gia siêu dẻo thường được sử dụng để làm cho HPC dẻo hơn và tăng tính công tác của bê tông. Bê tông tính năng cao hầu hết có cường độ và tính bền cao hơn bê tông thường [4-6], [11].

Có rất nhiều phương pháp thiết kế cấp phối cho bê tông tính năng cao đã được đề xuất. Trong các phương pháp, điều quan trọng đầu tiên được đưa ra là lựa chọn tỷ lệ nước/ chất kết dính (N/CKD) cho cường độ bê tông thiết kế nhất định, mặc dù tỷ lệ N/CKD không phải là một yếu tố dự báo tốt về cường độ nén của HPC. Việc sử dụng các phụ gia như Silica Fume kết hợp với một lượng phụ gia siêu dẻo phù hợp là cách thường dùng để chế tạo HPC [7-8].

Vì vậy mục tiêu của bài báo là lựa chọn được cấp phối tối ưu cho bê tông tính năng cao với cường độ chịu nén 60MPa và độ chảy xòe lớn hơn 600 mm. Kết quả nghiên cứu này cũng đã phân tích những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến cường độ của Bê tông tính năng cao, xây dựng bài toán tối ưu các yếu tố ảnh hưởng này, làm rõ các thành phần và phương pháp thi công Bê tông tính năng cao và đề xuất phạm vi sử dụng Bê tông tính năng cao trong lĩnh vực xây dựng [10].

2. Nghiên cứu xây dựng mô hình hồi quy

2.1. Lựa chọn hàm mục tiêu.

Thiết kế cấp phối bê tông tính năng cao theo phương pháp của ACI. Để đạt cường độ cao với tỷ lệ N/CKD thấp và để đạt được tính công tác tốt thì phụ gia siêu dẻo được sử dụng hợp lý [4].

Bài báo áp dụng bài toán quy hoạch thực nghiệm để tính toán dựa trên kế hoạch thực nghiệm có khoa học để lựa chọn thành phần HPC tối ưu nhằm thỏa mãn 2 hàm mục tiêu là: Cường độ chịu nén và độ chảy xòe của HPC sao cho cấp phối của nó là tối ưu nhất.

2.2. Lựa chọn các yếu tố ảnh hưởng.

Các yếu tố ảnh hưởng đến cường độ chịu nén và độ chảy xòe của HPC bao gồm nhiều yếu tố, nhưng để giảm thiểu số thí nghiệm, cần thiết phải giả thiết một số yếu tố giữ nguyên không thay đổi như: Hàm lượng nước, cốt liệu (cát, đá) đã tính toán được sơ bộ ban đầu, trong kế hoạch thực nghiệm không thay đổi. Như vậy ảnh hưởng rõ rệt nhất đến 2 hàm mục tiêu trên tiêu gồm 2 yếu tố:

Z_1 : Lượng dùng xi măng trong 1 m³ bê tông (kg). Sử dụng xi măng PC40, cường độ đạt 48MPa ở tuổi 28 ngày [12].

Z_2 : Hàm lượng phụ gia khoáng so với tổng lượng CKD (%).

Dựa vào cấp phối HPC của một số nước và khảo sát được của một

số công trình tại Việt Nam, bài báo chọn giá trị biến thiên của 2 yếu tố ảnh hưởng, như Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị và khoảng biến thiên của các yếu tố ảnh hưởng.

Giá trị	Z_1 (kg)	Z_2 (%)
Khoảng biến thiên	$350 \leq Z_1 \leq 450$	$5 \leq Z_2 \leq 25$
Z_j^0	400	15
ΔZ_j	50	10

Để tiện tính các hệ số thực nghiệm của mô hình toán hồi quy và tiến hành các bước xử lý số liệu khác, ta chuyển sang giá trị mã hóa không thứ nguyên, với giá trị cận trên và cận dưới là +1 và -1, giá trị trung bình: $x_j^0 = 0$ (gốc tọa độ).

Như vậy ta có: $x_j = \frac{Z_j - Z_j^0}{\Delta Z_j}$ với $j = 1, 2, 3, \dots, k$; với k là số lượng biến số đầu vào, trong bài toán $k = 2$;

Z_j : Giá trị thực của tham số đầu vào thứ j (còn gọi là biến số thực);

x_j : Giá trị mã hóa của tham số đầu vào thứ j (còn gọi là biến số mã hóa);

Z_j^0 : Mức cơ sở của tham số đầu vào thứ j;

$$\Delta Z_j = \frac{Z_j^{\max} - Z_j^{\min}}{2}$$

2.3. Xây dựng mô hình

Đề xuất mô hình hồi quy phi tuyến bậc hai và có dạng như sau [9]:

$$y = b_0^* + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{u,j \neq 1} b_{ju} x_u x_j + \dots + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 \quad (1)$$

trong đó các tham số b_0, b_j, b_{ju}, k được xác định theo công thức:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}; b_{jj} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 y_i}{\sum_{i=1}^N (x_{ji}^2)^2}; b_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ui} y_i}{\sum_{i=1}^N (x_{ji} x_{ui})^2} \quad (2)$$

Cụ thể phương trình hồi quy có dạng :

$$y = b_0^* + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 \quad (3)$$

Tiến hành thêm các thí nghiệm theo ma trận kế hoạch thực nghiệm trực giao bậc 2 bảng 2 để xác định mô hình.

Trong kế hoạch thực nghiệm trực thực nghiệm trực giao bậc 2 vẫn cần có cả các thực nghiệm lặp lại tại tâm bổ sung.

Để đơn giản sử dụng dạng rút gọn tức là chỉ dừng lại ở 2^k là 4 thí nghiệm, những điểm thực nghiệm mới được đưa thêm vào là những điểm nằm trên trục tọa độ có khoảng cách bằng α tính từ tâm kế hoạch gọi là các điểm sao Hình 1.

Khoảng cách α gọi là cách tay đòn của các điểm sao. Ngoài cần bổ sung thêm một thí nghiệm thực ở tâm. Như vậy kế hoạch thực nghiệm bổ sung gồm số thực nghiệm sau :

$$N = 2^k + 2n + n_0 = 2^2 + 4 + 1 = 9$$

Trong đó:

N – Tổng số thực nghiệm; k – số biến số (tham số) đầu vào;

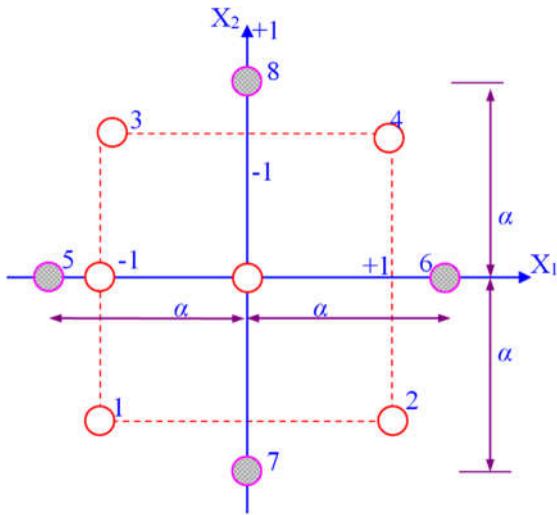
2n – lượng điểm sao ;

n_0 – số lượng thực nghiệm ở tâm kế hoạch.

Để tiện tính toán chọn $\alpha = 1$, như vậy sẽ có 4 điểm sao có các tọa độ là 5(-1,0); 6(1,0); 7(0,-1); 8(0,1);

Trong tính toán cần xét giá trị x_j^2 , tuy nhiên do các giá trị x_0, x_j^2 luôn bằng +1 dẫn đến các biểu thức:

$\sum_{j=1}^N x_{0j} x_{ji}^2 \neq 0$ và $\sum_{j=1}^N x_{ju}^2 x_{ji}^2 \neq 0$
 nên giả thiết về điều kiện ma trận trực giao không đảm bảo.



Hình 1. Sơ đồ các điểm thực nghiệm cho phương án thực nghiệm bậc 2.

(4) Để đảm bảo điều kiện ma trận trực giao cần phải đặt thêm các biến số (mã hoá).

$$x'_j = x_j^2 - \chi \quad (5)$$

Với $\chi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji}^2$ trong đó x_{ji} là giá trị mã hoá của biến số thứ j tại lần thí nghiệm i .

Thành phần cấp phối được sử dụng cho kế hoạch thực nghiệm thử nghiệm như Bảng 2.

Bảng 2. Bảng thành phần cấp phối cho kế hoạch thực nghiệm.

TT	N/CK (kg)	XM (kg)	Cát (kg)	Đá dăm (kg)	Nước (lít)	AM-S400 (lít)	Silicafume (kg)
1	0,30	350	775	1050	140	4,5	116,7
2	0,30	350	775	1050	120	4,5	50,0
3	0,30	350	775	1050	111	4,5	18,5
4	0,30	400	775	1050	126	4,5	21,1
5	0,30	400	775	1050	137	4,5	57,1
6	0,30	400	775	1050	160	4,5	133,3
7	0,30	450	775	1050	180	4,5	150,0
8	0,30	450	775	1050	154	4,5	64,3
9	0,30	450	775	1050	142	4,5	24,0



(a) Khuôn đúc mẫu



(b) Dụng cụ đo độ chảy xòe



(c) Đo độ chảy xòe



(d) Đo cường độ chịu nén của mẫu bê tông

Hình 2. Dụng cụ thực nghiệm cho phương án thực nghiệm bậc hai.

Kết quả tập hợp ở trong Bảng 3 có $\alpha = 1$ và $\chi = 6/9 = 2/3$

Bảng 3. Bảng kế hoạch thực nghiệm.

TTPA thực nghiệm	Biến số thực		Biến mã hoá				y_1	y_2		
	Z_1	Z_2	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$x'_1 = x_1^2 - \chi$	$x'_2 = x_2^2 - \chi$		
	kg	%					(Mpa)	(mm)		
TN. chính										
1	350	5	+	-	-	+	$1 - \chi = +1/3$	$1 - \chi = +1/3$	61,01	668,5
2	450	5	+	+	-	-	$1 - \chi = +1/3$	$1 - \chi = +1/3$	65,64	632,22
3	350	25	+	-	+	-	$1 - \chi = +1/3$	$1 - \chi = +1/3$	61,01	685,00
4	450	25	+	+	+	+	$1 - \chi = +1/3$	$1 - \chi = +1/3$	65,64	665,88
Các điểm sao										
5	350	12,5	+	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2 - \chi = +1/3$	$-\chi = -2/3$	61,01	683,16
6	450	12,5	+	$+\alpha$	0	0	$\alpha^2 - \chi = +1/3$	$-\chi = -2/3$	65,64	645,96
7	400	5	+	0	$-\alpha$	0	$-\chi = -2/3$	$\alpha^2 - \chi = +1/3$	63,32	610,32
8	400	25	+	0	$+\alpha$	0	$-\chi = -2/3$	$\alpha^2 - \chi = +1/3$	63,32	660,98
Tâm										
9	400	12,5	+	0	0	0	$-\chi = -2/3$	$-\chi = -2/3$	63,32	642,66
TN lặp tại tâm										
10	400	12,5	+	0	0	0	$-\chi = -2/3$	$-\chi = -2/3$	62,01	665,00
11	400	12,5	+	0	0	0	$-\chi = -2/3$	$-\chi = -2/3$	61,01	642,00
12	400	12,5	+	0	0	0	$-\chi = -2/3$	$-\chi = -2/3$	63,61	650,00

Căn cứ vào các số liệu ở ma trận thực nghiệm ta tính được các hệ số b theo các công thức của (2) :

+) Với hàm mục tiêu cường độ chịu nén y_1 :

$$b_0 = \frac{(61,01 + 65,64 + 61,01 + 65,64 + 61,01 + 65,64 + 63,32 + 63,32 + 63,32)}{(1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)} = 63,32$$

$$b_1 = \frac{(-61,01 + 65,64 - 61,01 + 65,64 - 61,01 + 65,64 + 0 \times 63,32 + 0 \times 63,32)}{(1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)} = 2,315$$

$$b_2 = \frac{(-61,01 - 65,64 + 61,01 + 65,64 + 0 \times 61,01 + 0 \times 65,64 - 63,32 + 0 \times 63,32)}{(1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)} = 0$$

$$b_{12} = \frac{(61,01 - 65,64 - 61,01 + 65,64 + 0 \times 61,01 + 0 \times 65,64 - 0 \times 63,32 + 0 \times 63,32)}{(1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)} = 0$$

$$b_{11} = \frac{\frac{1}{3}61,01 + \frac{1}{3}65,64 + \frac{1}{3}61,01 + \frac{1}{3}65,64 + \frac{1}{3}61,01 + \frac{1}{3}65,64 - \frac{2}{3}63,32 - \frac{2}{3}63,32 - \frac{2}{3}63,32}{\left\{\left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2\right\}} = 0,005$$

$$b_{22} = \frac{\frac{1}{3}61,01 + \frac{1}{3}65,64 + \frac{1}{3}61,01 + \frac{1}{3}65,64 - \frac{2}{3}61,01 - \frac{2}{3}65,64 + \frac{1}{3}63,32 + \frac{1}{3}63,32 - \frac{2}{3}63,32}{\left\{\left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2\right\}} = 0$$

Sau khi tính được các giá trị b_j, b_{ju}, b_{jj} phương trình hồi quy sẽ có dạng :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (6)$$

Để chuyển các biến thành các biến x_j cần thay biểu thức (2) vào

(4) có được:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}(x_1^2 - \chi) + b_{22}(x_2^2 - \chi) = b_0 - \chi(b_{11} + b_{22}) + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 =$$

trong đó:

$$b_0 = b_0^* - \chi \sum_{i=1}^k b_{ij} = b_0^* - \chi(b_{11} + b_{22}) \quad (8)$$

Thay số vào (9) có :

$$b_0 = b_0^* - \chi(b_{11} + b_{22}) = 63,53 - \frac{2}{3}(0,005 + 0) = 63,53$$

Kết quả có được phương trình hồi quy phi tuyến bậc 2:

$$y_1 = 63,53 + 2,315x_1 + 0,005x_1^2 \quad (9)$$

+) Với hàm mục tiêu độ chảy xòe y_2 :

$$b_0 = \frac{(668,5 + 632,22 + 685 + 665,88 + 683,16 + 645,96 + 610,32 + 660,98 + 642,66)}{(1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)} = 654,96$$

$$b_1 = \frac{(-668,5 + 632,22 - 685 + 665,88 - 683,16 + 645,96 + 0 + 0 + 0)}{(1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)} = -15,43$$

$$b_2 = \frac{(-668,5 - 632,22 + 685 + 665,88 + 0 + 0 - 610,32 + 660,98 + 0)}{(1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)} = 16,8$$

$$b_{12} = \frac{(668,5 - 632,22 - 685 + 665,88 + 0 + 0 + 0 + 0)}{(1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2)} = 4,29$$

$$b_{11} = \frac{\frac{1}{3}668,5 + \frac{1}{3}632,22 + \frac{1}{3}685 + \frac{1}{3}665,88 + \frac{1}{3}683,16 + \frac{1}{3}645,96 - \frac{2}{3}610,32 - \frac{2}{3}660,98 - \frac{2}{3}642,66}{\left\{\left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2\right\}} = 25,47$$

$$b_{22} = \frac{\frac{1}{3}668,5 + \frac{1}{3}632,22 + \frac{1}{3}685 + \frac{1}{3}665,88 - \frac{2}{3}683,16 - \frac{2}{3}645,96 + \frac{1}{3}610,32 + \frac{1}{3}660,98 - \frac{2}{3}642,66}{\left\{\left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{2}{3}\right)^2\right\}} = -3,44$$

$$b_0 = b_0^* - \chi(b_{11} + b_{22}) = 654,96 - \frac{2}{3}(25,47 - 3,44) = 640,27$$

Kết quả có được phương trình hồi quy phi tuyến bậc 2:

$$y_2 = 640,27 - 15,43x_1 + 16,8x_2 + 4,29x_1x_2 + 25,47x_1^2 - 3,44x_2^2 \quad (10)$$

3. Kiểm tra mô hình hồi quy.

3.1 Kiểm tra lại theo phương pháp student.

Với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$ bậc tự do lặp $f_2 = 3 - 1 = 2$ có được $t_{0,05,2} = 4,3$. Tính lại độ lệch chuẩn với số thí nghiệm $N = 9, m = 3$:

+) Với hàm mục tiêu cường độ chịu nén y_1

$$\bar{y}^0 = \frac{\sum_{i=1}^m y_{ii}^0}{m} = \frac{(62,01 + 61,01 + 63,61)}{3} = 62,21$$

$$S_{ii}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ii}^0 - \bar{y}^0)^2 = \frac{1}{3-1} [(62,01 - 62,21)^2 + (61,01 - 62,21)^2 + (63,61 - 62,21)^2] = 1,72$$

Độ lệch chuẩn của phân bố b_j là:

$$S_{bj} = \left(\frac{S_{ii}^2}{N}\right)^{0,5} = \frac{S}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{1,72}}{\sqrt{9}} = \frac{1,311}{3} = 0,437$$

+ Với hàm mục tiêu độ chảy xòe y_2 :

$$y^{-0} = \frac{\sum_{u=1}^m y_{ui}^0}{m} = \frac{(665 + 642 + 650)}{3} = 652,33$$

$$S_{li}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (y_{ui}^0 - y^{-0})^2$$

$$= \frac{1}{3-1} [(665 - 652,33)^2 + (642 - 652,33)^2 + (650 - 652,33)^2]$$

$$= 136,33$$

Độ lệch chuẩn phân bố b_j là

$$S_{bj} = \left(\frac{S_{li}^2}{N}\right)^{0,5} = \frac{S}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{136,33}}{\sqrt{9}} = \frac{11,68}{3} = 3,89$$

Muốn hệ số b_0 và b_j có nghĩa thì phải thoả mãn điều kiện :

$$|b| \geq t_{0,05,2} S_{li}$$

+ Với hàm mục tiêu cường độ chịu nén y_1 :

$$b_0 = |63,53| \geq 4,3 \times 0,437 = 1,879 \rightarrow \text{có nghĩa}$$

$$b_1 = |2,315| > 1,879 \rightarrow \text{có nghĩa}$$

$$b_2 = 0 < 1,879 \rightarrow \text{không có nghĩa}$$

$$b_{12} = 0 < 1,879 \rightarrow \text{không có nghĩa}$$

$$b_{11} = |0,005| < 1,879 \rightarrow \text{không có nghĩa}$$

$$b_{22} = 0 < 1,879 \rightarrow \text{không có nghĩa}$$

+ Với hàm mục tiêu độ chảy xê y_2 :

$$b_0 = |640,27| \geq 4,3 \times 3,89 = 16,74 \rightarrow \text{có nghĩa}$$

$$b_1 = |-15,43| < 16,74 \rightarrow \text{không có nghĩa}$$

$$b_2 = |16,8| \geq 16,74 \rightarrow \text{có nghĩa}$$

$$b_{12} = |4,29| < 16,74 \rightarrow \text{không có nghĩa}$$

$$b_{11} = |25,47| \geq 16,74 \rightarrow \text{có nghĩa}$$

$$b_{22} = |-3,44| < 16,74 \rightarrow \text{không có nghĩa}$$

Kết quả của các phương trình mô tả mô hình quy hồi có dạng sau đây :

$$y_1 = 63,53 + 2,315x_1 \quad (11)$$

$$y_2 = 640,27 + 16,8x_2 + 25,47x_1^2 \quad (12)$$

3.2 Kiểm tra điều kiện tương hợp của mô hình hồi quy.

Để kiểm tra điều kiện tương hợp của mô hình, ta lại phải tính các giá trị của phương sai tương ứng với số lần thử nghiệm $N = 9$:

$$S_d^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

trong đó :

S_d - phương sai dư ;

N - số lượng thực nghiệm ;

l - số lượng hệ số có mặt trong phương trình .

+ Với hàm mục tiêu cường độ chịu nén y_1 :

$N = 9$; $l = 2$ lấy theo số lượng ở bảng 3 có được :

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = \frac{1}{9} (61,01 + 65,64 + 61,01 + 65,64 + 61,01 + 65,64 + 63,32 + 63,32 + 63,32) = 63,32$$

$$S_d^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

$$= \frac{1}{9-2} \left[(61,01 - 63,32)^2 + (65,64 - 63,32)^2 + (61,01 - 63,32)^2 + (65,64 - 63,32)^2 + (61,01 - 63,32)^2 + (65,64 - 63,32)^2 + (63,32 - 63,32)^2 + (63,32 - 63,32)^2 + (63,32 - 63,32)^2 \right] = 4,594$$

+ Với hàm mục tiêu độ chảy xê y_2 :

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_0 y_i = \frac{1}{9} (668,5 + 632,22 + 685 + 665,88 + 683,16 + 668,5 + 645,96 + 610,32 + 660,98 + 642,66) = 654,96$$

$$S_d^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{i=1}^N (y_{2i} - \bar{y}_2)^2 =$$

$$= \frac{1}{9-2} \left[(668,5 - 654,96)^2 + (632,22 - 654,96)^2 + (685 - 654,96)^2 + (665,88 - 654,96)^2 + (683,16 - 654,96)^2 + (645,96 - 654,96)^2 + (610,32 - 654,96)^2 + (660,98 - 654,96)^2 + (642,66 - 654,96)^2 \right] = 682,65$$

3.3 Kiểm tra theo tiêu chuẩn fisher.

$$\text{Với } y_1: F_1 = \frac{S_d^2}{S_{li}^2} = \frac{4,594}{1,72} = 2,67$$

$$\text{Với } y_2: F_2 = \frac{S_d^2}{S_{li}^2} = \frac{682,65}{136,33} = 5$$

Với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$ bậc tự do lặp $f_2 = 3 - 1 = 2$; bậc tự do dư $f_1 = N - m = 9 - 2 = 7$ có được chuẩn Fischer $F_{0,05,7,2} = 4,7$. Kết quả có $F_1 = 2,67 < F_{0,05,7,2} = 4,7$ mô hình thể hiện ở công thức 11 là tương hợp

Với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$ bậc tự do lặp $f_2 = 3 - 1 = 2$; bậc tự do dư $f_1 = N - m = 9 - 3 = 6$ có được chuẩn Fischer $F_{0,05,6,2} = 5,1$. Kết quả có $F_2 = 5 < F_{0,05,6,2} = 5,1$ mô hình thể hiện ở công thức 12 là tương hợp

3.4 Lựa chọn cấp phối tối ưu.

Thay $x_1 = \frac{Z_j - Z_j^0}{\Delta Z_j} = \frac{Z_1 - Z_1^0}{\Delta Z_1} = \frac{Z_1 - 400}{50}$ và $x_2 = \frac{Z_j - Z_j^0}{\Delta Z_j} = \frac{Z_2 - Z_2^0}{\Delta Z_2} = \frac{Z_2 - 15}{10}$ vào công thức 11 và 12 nhận được :

$$y_1 = 45,01 + 0,0463Z_1$$

$$y_2 = 0,01Z_1^2 - 8,15Z_1 + 1,68Z_2 + 2245,15 \quad (13)$$

Trong đó:

y_1 : là cường độ bê tông (Mpa)

y_2 : là độ chảy xê của bê tông (mm)

Z_1 : là hàm lượng xi măng (kg)

Z_2 : là hàm lượng phụ gia (%)

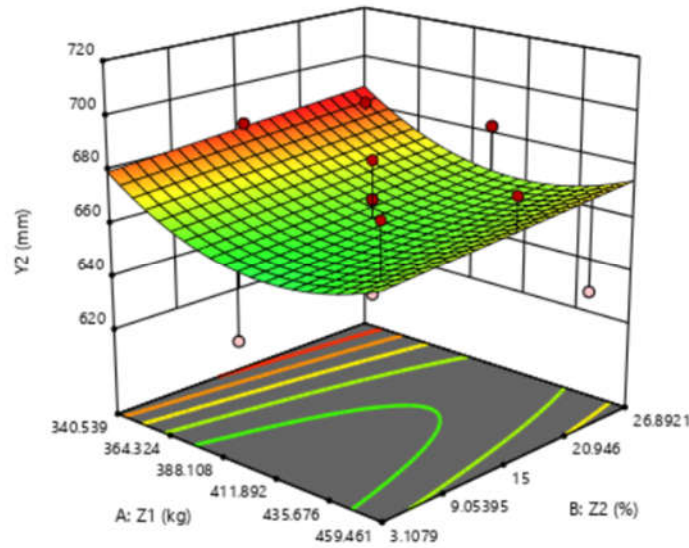
Cường độ bê tông và độ chảy xê của bê tông phụ thuộc vào hàm lượng xi măng và hàm lượng phụ gia được thể hiện ở Hình 3 và Hình 4.

Để kiểm tra độ tin cậy của phương trình hồi quy 13 tiến hành tính toán kiểm chứng với kết quả thí nghiệm thăm dò ở Bảng 4. Thay các giá trị y_1 và y_2 lúc này được coi như yêu cầu đầu vào đối với cấp phối HPC tính ngược lại được các yếu tố ảnh hưởng Z_1 và Z_2 .

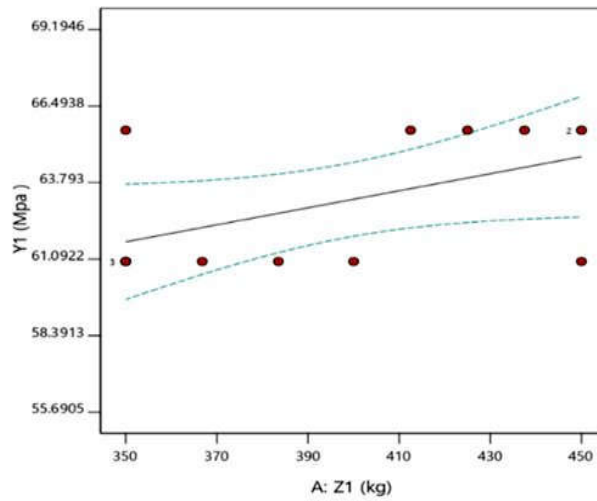
Kết quả tính kiểm chứng tổng hợp ở bảng 4 cho thấy độ tin cậy của các phương trình hồi quy đã lập ở công thức 13.

Có thể thấy trị số tính toán theo phương trình hồi quy có sự sai khác không nhiều so với kết quả thí nghiệm thăm dò. Đối với cả 4 thí nghiệm thăm dò thì trị số cường độ chịu nén của bê tông tương trùng khớp giữa giá trị tính toán và thực nghiệm, còn độ chảy xê có sự sai khác lần lượt là 6,5% - 3,6% - 3,9% - 3,4%. Với sai số trên thì có thể thấy phương trình hồi quy thu được ở phương trình 13 là đáng tin cậy.

Từ các phương trình 13 có thể chọn các giá trị tối ưu yếu tố ảnh hưởng Z_1 và Z_2 với cường độ và độ chảy xê của HPC cho trước (với các điều kiện cường độ chịu nén $y_1 > 60$ MPa, y_1 min; độ chảy xê $y_2 > 60$ mm) . Ta tính toán được $Z_1 = 350$ kg, $Z_2 = 5\%$ và có kết quả thành phần cấp phối tối ưu ghi như trong Bảng 5.



Hình 3. Độ chảy xè của bê tông - y_2 (mm) phụ thuộc vào hàm lượng xi măng - Z_1 (kg) và hàm lượng phụ gia - Z_2 (%).



Hình 4. Cường độ bê tông - y_1 (Mpa) phụ thuộc vào hàm lượng xi măng - Z_1 (kg).

Bảng 4. Tính toán kiểm chứng cho thí nghiệm thăm dò với cấp phối HPC.

TT	Thực nghiệm thăm dò tính toán				Tính toán kiểm chứng			
	Z_1 (kg)	y_1 (MPa)	Z_2 (%)	y_2 (mm)	Z_1 (kg)	y_1 (MPa)	Z_2 (%)	y_2 (mm)
1	350	61,01	5	668,50	350	61,22	5	624,73
2	450	65,64	5	632,22	450	65,85	5	609,73
3	350	61,01	25	685,00	350	61,22	25	658,33
4	450	65,64	25	665,88	450	65,85	25	643,33

Bảng 5. Thành phần cấp phối tối ưu HPC.

TT	N/CKD (kg)	XM (kg)	Cát (kg)	Đá dăm (kg)	Nước (lít)	AM-S400 (lít)	Silicafume (kg)
1	0,3	350	775	1050	111	4,5	18,5

4. Kết luận

- Phương pháp quy hoạch thực nghiệm để tìm ra được phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa các hàm mục tiêu: Cường độ chịu nén, độ chảy xè với các yếu tố ảnh hưởng như: Lượng dùng xi măng, hàm lượng phụ gia khoáng,...nhằm tiết kiệm kinh phí làm thí nghiệm mà vẫn cho kết quả tập trung, có phương hướng áp dụng cho bê tông tính năng cao HPC.

- Phương trình hồi quy biểu diễn sự phụ thuộc của cường độ chịu nén vào hàm lượng xi măng; độ chảy xè của bê tông phụ thuộc hàm lượng phụ gia và hàm lượng xi măng của bê tông tính năng cao HPC.

- Hàm lượng phụ gia khoáng không xuất hiện trong phương trình hồi quy xác định cường độ chịu nén của bê tông ($x_2=0$), đồng nghĩa với việc hàm lượng phụ gia khoáng khi thay đổi trong khoảng từ 5 - 25% thì không ảnh hưởng nhiều đến cường độ chịu nén của bê tông tính năng cao HPC.

- Phụ gia khoáng kéo dài thời gian đông kết nên chọn theo hướng dẫn của nhà sản xuất, tùy thuộc vào tình hình thi công của nhà thầu mà thí nghiệm để chọn ra loại phụ gia thích hợp. Về nguyên lý, lượng dùng xi măng trong HPC càng thấp, mác xi măng thấp thì làm giảm cường độ của bê tông.

- Thời gian nghiên cứu bị hạn chế nên mới xét đến tuổi của HPC là 28 ngày, cần được nghiên cứu tiếp ở các tuổi nhiều ngày hơn. Nghiên cứu mới áp dụng bài toán đơn giản với 2 yếu tố ảnh hưởng, Cần nghiên cứu tiếp với bài toán gồm nhiều các yếu tố ảnh hưởng hơn, để làm căn cứ đưa vào tiêu chuẩn hiện hành.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Thăng N.C., Tuấn N.V., Hanh P.H., and Lâm N.T. (2013). *Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng hỗn hợp phụ gia khoáng silica fume và tro bay sẵn có ở Việt Nam*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ISSN 1859.1566, số 02/2013: pp. trang 24-31.
- [2]. Camacho E. (2013). *Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties*. Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Science UPV, Universitat Politècnica de Valencia
- [3]. Richard P. and Cheyrezy M. (1995). *Composition of reactive powder concretes*. Cement and concrete research, 25(7): pp. 1501-1511.
- [4]. Buck J.J., McDowell D.L., and Zhou M. (2013). *Effect of microstructure on load-carrying and energy-dissipation capacities of UHPC*. Cement and concrete research, 43: pp. 34-50.
- [5]. Fairbairn, E.M. and M. Azenha, *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS*. Vol. 27. 2018: Springer.
- [6]. Schmidt M., Fehling E., Bornemann R., Bunje K., and Teichmann T. (2003). *Ultra-high performance concrete: Perspective for the precast concrete industry*. BETONWERK UND FERTIGTEILTECHNIK, 69(3): pp. 16-29.
- [7]. ACI, ACI (2010), ACI 363R-10. *Report on High-Strength Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [8]. ACI, ACI 211.4R (2008). *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials*. 2008.
- [9]. Ý, D. N. (2010). *Quy hoạch và xử lý số liệu thực nghiệm* - Nhà xuất bản xây dựng
- [10]. Thăng N.C. and Hanh P.H. *Nghiên cứu, khảo sát sử dụng tro bay chế tạo bê tông chất lượng siêu cao*. 2012.
- [11]. Nguyễn Văn Tuấn và cộng sự, *Bê tông chất lượng siêu cao*. 2017, Hà Nội: Nhà xuất bản Xây Dựng.
- [12]. TCVN 2682:2009, *Xi măng poóc lăng - Yêu cầu kỹ thuật*.