

MÔ PHỎNG ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÀNH PHẦN ĐẾN CƯỜNG ĐỘ BÊ TÔNG PHUN HẠT MỊN BẰNG THỰC NGHIỆM

SIMULATION OF EFFECT OF COMPONENT ON THE STRENGTH OF FINE-GRAINED SHOTCRETE BY EXPERIMENTAL METHOD

Tăng Văn Lâm⁽¹⁾, Vũ Kim Diên⁽²⁾, Bulgakov Boris Igorevich⁽³⁾, Bazhenova Sophia Ildarovna⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Nghiên cứu sinh, khoa Công nghệ Bê tông và Chất kết dính, Đại học Xây dựng Quốc gia Mátxcova, Liên bang Nga, Email: lamvantang@gmail.com

⁽²⁾ Nghiên cứu sinh, khoa Công nghệ Bê tông và Chất kết dính, Đại học Xây dựng Quốc gia Mátxcova, Liên bang Nga, Email: kimdienxdtb@gmail.com

⁽³⁾ Phó giáo sư, Tiến sĩ, khoa Công nghệ Bê tông và Chất kết dính, Đại học Xây dựng Quốc gia Mátxcova, Liên bang Nga, Email: fakultetst@mail.ru

⁽⁴⁾ Phó giáo sư, Tiến sĩ, khoa Công nghệ Bê tông và Chất kết dính, Đại học Xây dựng Quốc gia Mátxcova, Liên bang Nga, Email: sofia.bazhenova@gmail.com

Tóm tắt

Bài viết đã sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để mô phỏng ảnh hưởng của tỷ lệ nước - xi măng (N/X) và cát - chất kết dính (C/CKD) đến các hàm mục tiêu bậc hai là cường độ nén của bê tông phun hạt mịn tại các tuổi khác nhau. Từ các hàm mục tiêu thu được đã chỉ ra rằng cả hai biến N/X và C/CKD đều có ảnh hưởng đáng kể đến các giá trị của mô hình thực nghiệm. Đồng thời, sử dụng phần mềm Matlab và Maple đã biểu diễn được các bề mặt biểu hiện, đường đồng mức của mô hình thực nghiệm và xác định được giá trị lớn nhất của cường độ nén ở 3, 7, 14 và 28 ngày của bê tông. Hơn nữa, tương quan giữa cường độ nén lớn nhất của mẫu bê tông theo thời gian cũng đã được xác định trong nghiên cứu này.

Từ khóa: Mô phỏng, Bê tông phun hạt mịn, Cường độ nén, Biến ảnh hưởng, Hàm mục tiêu.

Abstract

The paper uses the mathematical method of two-factors rotatable central compositional planning to simulate the effect of the ratio of water-cement (N/X) and sand - binder (C/CKD) as the input parameters on the objective functions of compressive strength of fine-grained shotcrete at different ages. From the obtained objective functions, it has been shown that the both two-input parameters have a significant influence on the values of the experimental models. Particularly, the use of Matlab and Maple software shows the expression surface, the contour line of the experimental model and determined the maximum value of compressive strength of fine-grained concrete at 3, 7, 14 and 28 days. Furthermore, the correlation between the maximum compressive strength of concrete over time also was investigated in this study.

Keywords: Simulation, Fine-grained shotcrete, Compressive strength, Parameter, Objective function.

1. Tổng quan

Trong xây dựng hiện đại ngày nay, bê tông hạt mịn đã ngày càng được sử dụng đa dạng hơn, từ vật liệu hoàn thiện bề mặt đến kết cấu chịu lực trong nhà cao tầng [1], công trình thủy [2], công trình biển và nhiều công trình đặc biệt khác. Những năm gần đây, trên thế giới cũng như Việt Nam đã sử dụng nhiều loại bê tông hạt mịn cường độ cao trong xây dựng các công trình ngầm với hiệu quả cao [3, 4]. Bê tông phun đã được phát minh vào những năm đầu của thập kỷ 90, nhưng phải đến cuối thế kỷ 20 loại bê tông này mới được xem là một trong những vật liệu dùng để chống giữ các công trình ngầm [5, 6].

Khi ứng dụng bê tông hạt mịn với cường độ cao để làm bê tông phun, do khả năng đông kết và rắn chắc nhanh, khi được phun lên thành vách hoặc mái dốc của đường hầm, hồ hợp bê tông phun bám dính tốt, giảm lượng bụi phát thải ra môi trường, không tạo ra vật liệu thừa, rơi vãi tại chân các đường hầm. Mặt khác, khi sử dụng kết hợp với các loại phụ gia biến tính đã tạo ra hỗn hợp nước - chất kết dính - cốt liệu có tính công tác tốt, đông kết nhanh đảm bảo các yêu cầu đối với hỗn hợp bê tông phun tại hiện trường [3].

Hơn nữa, trong công nghệ bê tông hiện đại có rất nhiều phương pháp thiết kế, mô phỏng và tối ưu hoá thành phần của hỗn hợp bê tông. Tuy nhiên ngày nay nhờ sự có mặt của công cụ máy tính và các phần mềm toán ứng dụng đã cho phép lựa chọn ứng dụng phương pháp số hiệu quả, độ chính xác lớn và tính khả thi cao.

Theo [7, 8, 9], quy hoạch thực nghiệm trên cơ sở mô hình thống kê được sử dụng để nghiên cứu nhiều đối tượng khác nhau, trong đó có đối tượng là các thành phần vật liệu ảnh hưởng đến các tính chất của hỗn hợp bê tông, cũng như bê tông. Các quá trình xảy ra trong các đối tượng nghiên cứu - hỗn hợp bê tông được đặc trưng bằng các biến ảnh hưởng, giữa chúng có quan hệ nguyên nhân - kết quả. Các biến đóng vai trò nguyên nhân, gọi là biến vào, còn các biến phản ánh kết quả do nguyên nhân gây ra, được gọi là biến ra. Biến vào có thể kiểm soát và cũng có thể điều khiển được.

Trong bài viết này đã mô phỏng ảnh hưởng của hai biến là tỷ lệ nước - xi măng (N/X) và tỷ lệ cát - chất kết dính (C/CKD) đến cường độ nén của các mẫu bê tông hạt mịn tại các tuổi khác nhau bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson. Đồng thời, các bề mặt biểu hiện, đường đồng mức và giá trị cực trị của các hàm hồi quy cũng đã được xác định trong nghiên cứu này.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng.

Vật liệu đã sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm:

(1). Chất kết dính (CKD) bao gồm là Xi măng Pooclăng SEM I 42,5 N Holcim (Serebryakovutions) (X) thỏa mãn tiêu chuẩn GOST 31108-2016 (Nga), tro đáy (TĐ) loại F của nhà máy nhiệt điện tại khu vực “Kansko-Achinskogo” thỏa mãn GOST P 56592-2015 và Silica fume SF-90 (SF-90) của Elkem. Thành phần hóa học và các tính chất vật lý cơ bản của xi măng, tro đáy và silica fume được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1: Thành phần hóa học và tính chất vật lý của tro đáy “Kansko-Achinskogo”, silica fume SF-90 và xi măng Pooclăng SEM I 42,5 N Holcim

Loại vật liệu	Tro đáy	Silica Fume SF-90	Xi măng Pooclăng
SiO ₂	61,22	91,65	20,4
Al ₂ O ₃	21,17	2,25	4,4
Fe ₂ O ₃	5,85	2,47	5,4
SO ₃	2,42	-	3,4
K ₂ O	1,25	-	1,2
Na ₂ O	1,23	0,55	0,3
MgO	0,57	-	2,5
CaO	1,12	0,51	60,2
P ₂ O ₅	1,03	0,03	-
Lượng mất khi nung	4,14	2,54	2,2
Tỷ diện bề mặt riêng (m ² /g)	5,82	14,45	0,365
Khối lượng riêng (g/cm ³)	2,35	2,15	3,15
Khối lượng thể tích khô (kg/m ³)	575	760	1250

(2). Cốt liệu nhỏ sử dụng trong bê tông là cát vàng (C) (Schyolkovo - Nga) chất lượng tốt, thỏa mãn GOST 8736-2014, được sử dụng làm cốt liệu nhỏ trong hỗn hợp bê tông. Các tính chất vật lý của cốt liệu nhỏ sử dụng đã được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2: Tính chất vật lý của cốt liệu nhỏ sử dụng

Kích thước hạt (mm)	Khối lượng thể tích khô (kg/m ³)	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Khối lượng thể tích đầm chặt (kg/m ³)	Độ ẩm (%)	Mô đun độ lớn
0,15 ÷ 5	1520	2,65	1660	3	3,1

(3). Phụ gia siêu dẻo SR 5000F «SilkRoad» (SR5000) có khối lượng riêng 1,1 g/m³ ở nhiệt độ 25 ± 5°C. Đây là loại phụ gia giảm nước tầm cao, thể hệ 3, có thành phần dựa trên gốc Polycarboxylate.

(4). Nước sạch (N) được sử dụng để làm nước trộn hỗn hợp bê tông và bảo dưỡng mẫu thí nghiệm, thỏa mãn tiêu chuẩn GOST 23732-2011.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

- Sử dụng phương pháp laze trên máy nhiễu xạ «BT-9300z» (Trung Quốc) đã xác định được thành phần hạt của xi măng, tro đáy và silica fume SF-90.

- Thành phần bê tông hạt mịn được thiết kế theo phương pháp thể tích tuyệt đối và kết hợp giữa lý thuyết tính toán và thực nghiệm.

- Tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định bằng độ sụt của côn tiêu chuẩn kích thước 100x200x300 mm, theo GOST 10181-2014.

- Cường độ nén của bê tông được xác định trên mẫu lập phương 100x100x100mm theo tiêu chuẩn Nga GOST 10180-2012.

- Mô phỏng ảnh hưởng và xác định cấp phối tối ưu của hỗn hợp bê tông được thực hiện theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson. Phương pháp thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson cho phép thu được mô hình thực nghiệm chính xác hơn bằng cách tăng số lượng thí nghiệm lặp lại tại trung tâm và một số điểm thực nghiệm đặc biệt tại cánh tay tròn α [10].

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Các yêu cầu của hỗn hợp bê tông và bê tông

- Theo tiêu chuẩn Nga GOST 25192-2012, bê tông cường độ cao là loại bê tông có cấp độ bền B50 với cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày phải đạt 70 MPa. Từ cơ sở đó, trong nghiên cứu này đã tính toán thiết kế thành phần cấp phối của bê tông hạt mịn cường độ cao có cường độ nén yêu cầu ở tuổi 28 ngày trên 70 MPa, tính công tác tốt với độ sụt 10 ÷ 15 cm, được sử dụng làm hỗn hợp bê tông phun trong xây dựng các công trình ngầm ở các đô thị hoặc các khu mỏ của Việt Nam.

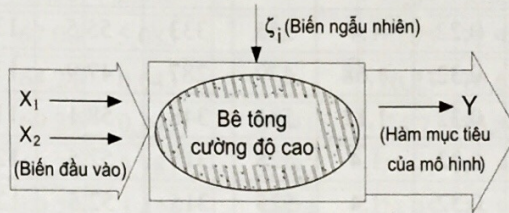
- Silica fume SF-90 với mục đích giảm lượng Ca(OH)₂ tự do trong bê tông, đã được chọn bằng 10% lượng dùng xi măng [1]. Tro đáy nhiệt điện được sử dụng với hai mục đích chính: (i) phụ gia khoáng mịn, bổ sung thành phần hạt trợ như một phần cốt liệu mịn để tăng độ đặc của cấu trúc và giảm co ngót của bê tông; (ii) thay thế một phần xi măng Pooc-lăng để giảm

lượng nhiệt thủy hóa, giảm sự hình thành vết nứt trên kết cấu. Theo tiêu chuẩn ACI 211.4R-08, hàm lượng tro đáy được lựa chọn bằng 30% lượng dùng xi măng.

- Lượng phụ gia siêu dẻo lấy bằng 1,5% lượng dùng xi măng [2]. Hàm lượng không khí trong hỗn hợp bê tông là 2,5% thể tích hỗn hợp bê tông [11].

3.2. Xây dựng mô hình thực nghiệm

Theo các nghiên cứu [6, 7] phương pháp quy hoạch thực nghiệm nhằm mục đích tạo ra mô hình toán học để mô phỏng và dự đoán ảnh hưởng của các biến đầu vào đến tính chất của đối tượng thực nghiệm được coi là các hàm mục tiêu đầu ra của quá trình nghiên cứu. Mô hình thực nghiệm trong nghiên cứu này được mô tả trên hình 1.



Hình 1: Cấu trúc mô hình thực nghiệm

Trong bài viết này, hàm mục tiêu bậc hai được lựa chọn là cường độ nén ở tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày của mẫu bê tông hình lập phương có cạnh 100mm đối với hai biến ảnh hưởng. Phương trình tổng quát của các hàm mục tiêu này có dạng như sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1X_2 + b_4X_1^2 + b_5X_2^2 \quad (1)$$

Trong đó: Y – là hàm mục tiêu của mô hình thực nghiệm; X₁ và X₂ – là các biến đầu vào; b₀, b₁, b₂, b₃, b₄, và b₅ – là các hệ số của hàm mục tiêu.

Nghiên cứu đã chọn các biến số đầu vào nhằm điều khiển hàm mục tiêu và khoảng biến thiên của chúng như sau:

- Tỷ lệ nước trên xi măng ($\frac{N}{X}$) mã hoá là X₁ thay đổi từ 0,30 đến 0,34.

- Tỷ lệ cát trên chất kết dính ($\frac{C}{CKD}$) mã hoá là X₂ thay đổi từ 1,2 đến 1,6.

Bảng 3: Khoảng biến thiên các biến số trong kế hoạch thực nghiệm bậc hai

Các nhân tố ảnh hưởng	Biến mã hóa	Các điểm quy hoạch bậc hai					Mức quy hoạch	
		- 1,414	- 1	0	+ 1	+ 1,414	δ	α = √2 = 1,414
$\frac{N}{X}$	X ₁	0,22	0,30	0,32	0,34	0,348	0,02	0,008
$\frac{C}{CKD}$	X ₂	1,12	1,2	1,4	1,6	1,68	0,2	0,08

Bảng 4: Cấp phối thực nghiệm theo quy hoạch bậc hai tâm xoay

STT	Biến mã		Biến thực		Cấp phối thực nghiệm (kg/m ³)					
	X ₁	X ₂	$\frac{N}{X}$	$\frac{C}{CKD}$	X	ĐB	SF-90	C	N	SR5000
1	+1	+1	0,34	1,6	486	292	48,6	1322	165	7,3
2	-1	+1	0,34	1,2	557	334	55,7	1137	189	8,4
3	+1	-1	0,30	1,6	496	298	49,6	1349	149	7,4
4	-1	-1	0,30	1,2	570	342	57,0	1163	171	8,6
5	+1,414	0	0,348	1,4	517	310	51,7	1230	180	7,8
6	-1,414	0	0,22	1,4	555	333	55,5	1320	122	8,3
7	0	+1,414	0,32	1,68	479	287	47,9	1367	153	7,2
8	0	-1,414	0,32	1,12	581	348	58,1	1106	186	8,7
9	0	0	0,32	1,4	525	315	52,5	1249	168	7,9
10	0	0	0,32	1,4	525	315	52,5	1249	168	7,9
11	0	0	0,32	1,4	525	315	52,5	1249	168	7,9
12	0	0	0,32	1,4	525	315	52,5	1249	168	7,9
13	0	0	0,32	1,4	525	315	52,5	1249	168	7,9

Bảng 5: Giá trị trung bình cường độ nén của bê tông ở tuổi 3 và 7 ngày

STT	X ₁	X ₂	Y ₃ = R ₃ (MPa)				Y ₇ = R ₇ (MPa)			
			Y _{3j}	\hat{Y}_{3j}	$(Y_{3j} - \hat{Y}_{3j})^2$	$(Y_{03j} - \hat{Y}_{03j})^2$	Y _{7j}	\hat{Y}_{7j}	$(Y_{7j} - \hat{Y}_{7j})^2$	$(Y_{07j} - \hat{Y}_{07j})^2$
1	+1	+1	32,51	31,29	1,498	-	46,51	47,07	0,319	-
2	-1	+1	33,55	33,49	0,003	-	48,83	53,13	18,454	-
3	+1	-1	30,45	30,08	0,137	-	45,08	43,74	1,798	-
4	-1	-1	31,22	32,29	1,139	-	48,17	49,79	2,625	-
5	+1,414	0	29,87	30,85	0,955	-	43,95	44,91	0,919	-
6	-1,414	0	34,85	33,96	0,791	-	57,28	53,44	14,737	-
7	0	+1,414	31,28	32,02	0,547	-	53,12	50,04	9,478	-
8	0	-1,414	30,97	30,32	0,425	-	45,14	45,34	0,039	-
9	0	0	32,85	33,64	0,618	0,618	53,96	55,44	2,196	2,196
10	0	0	34,05	33,64	0,171	0,171	55,52	55,44	0,006	0,006
11	0	0	33,64	33,64	0,000	0,000	54,03	55,44	1,994	1,994
12	0	0	33,4	33,64	0,056	0,056	57,42	55,44	3,912	3,912
13	0	0	34,24	33,64	0,365	0,365	56,28	55,44	0,702	0,702
Y ₃	$\Sigma(Y_{3j} - \hat{Y}_{3j})^2 = 6,706$		S _{3d} ² = 0,838		$\Sigma(Y_{03j} - \hat{Y}_{03j})^2 = 1,210$		S ₃₁₁ ² = 0,302		S _{3b1} = 0,1524	
Y ₇	$\Sigma(Y_{7j} - \hat{Y}_{7j})^2 = 57,181$		S _{7d} ² = 7,148		$\Sigma(Y_{07j} - \hat{Y}_{07j})^2 = 8,811$		S ₇₁₁ ² = 2,203		S _{7b1} = 0,4116	

Bảng 6: Giá trị trung bình cường độ nén của mẫu bê tông ở tuổi 14 và 28 ngày

z	X ₁	X ₂	Y ₁₄ = R ₁₄ (MPa)				Y ₂₈ = R ₂₈ (MPa)			
			Y _{14j}	\bar{Y}_{14j}	$(Y_{14j} - \bar{Y}_{14j})^2$	$(Y_{014j} - \bar{Y}_{014j})^2$	Y _{28j}	\bar{Y}_{28j}	$(Y_{28j} - \bar{Y}_{28j})^2$	$(Y_{028j} - \bar{Y}_{028j})^2$
1	+1	+1	66,57	64,04	6,384	-	72,45	69,67	7,703	-
2	-1	+1	70,01	68,03	3,931	-	75,97	74,36	2,598	-
3	+1	-1	63,15	62,08	1,136	-	68,4	68,00	0,163	-
4	-1	-1	67,44	66,07	1,882	-	74,04	72,68	1,850	-
5	+1,414	0	60,05	61,68	2,655	-	65,85	67,25	1,968	-
6	-1,414	0	65,87	67,30	2,036	-	72,64	73,86	1,480	-
7	0	+1,414	64,75	67,00	5,083	-	70,75	72,98	4,986	-
8	0	-1,414	63,44	64,24	0,643	-	70,23	70,62	0,149	-
9	0	0	68,7	69,28	0,341	0,341	74,7	75,86	1,346	1,346
10	0	0	71,23	69,28	3,787	3,787	77,81	75,86	3,802	3,803
11	0	0	67,42	69,28	3,474	3,474	74,95	75,86	0,828	0,828
12	0	0	68,95	69,28	0,112	0,112	75,55	75,86	0,096	0,096
13	0	0	70,12	69,28	0,699	0,699	76,29	75,86	0,185	0,185
Y ₁₄	$\sum(Y_{14j} - \bar{Y}_{14j})^2 = 32,163$		S _{14d} ² = 4,02		$\sum(Y_{014j} - \bar{Y}_{014j})^2 = 8,413$		S _{14il} ² = 2,103		S _{14bj} = 0,4022	
Y ₂₈	$\sum(Y_{28j} - \bar{Y}_{28j})^2 = 27,155$		S _{28d} ² = 3,394		$\sum(Y_{028j} - \bar{Y}_{028j})^2 = 6,257$		S _{28il} ² = 1,564		S _{28bj} = 0,3468	

Theo các nghiên cứu [8, 10], số thí nghiệm trong kế hoạch bậc hai tâm xoay của Box – Wilson được xác định theo công thức (2):

$$N = 2^k + 2 * k + n_0 = 2^2 + 2 * 2 + 5 = 13 \quad (2)$$

Trong đó: k - số biến thực nghiệm;

n₀ - số thí nghiệm lặp lại ở tâm của mô hình thực nghiệm.

Các cấp phối thực nghiệm của 13 điểm đối với hai biến đầu vào X₁ và X₂ đã được trình bày trong bảng 4. Bên cạnh đó, giá trị trung bình cường độ nén của bê tông ở tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày đã được mô tả chi tiết trong bảng 5 và 6.

3.3. Xác định hàm hồi quy để mô phỏng ảnh hưởng của các biến đến hàm mục tiêu

Áp dụng các công thức toán học theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box – Wilson và sử dụng phần mềm Matlab, đã thu được các phương trình hồi quy bậc hai về cường độ nén ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày của mẫu bê tông hạt mịn tương ứng có dạng như sau:

$$R_3 = 33,64 - 1,107 * X_1 + 0,6052 * X_2 - 0,5905 * X_1^2 - 0,0675 * X_1 * X_2 - 1,212 * X_2^2 \quad (3)$$

$$R_7 = 55,45 - 3,035 * X_1 + 1,673 * X_2 - 3,108 * X_1^2 + 0,1925 * X_1 * X_2 - 3,855 * X_2^2 \quad (4)$$

$$R_{14} = 69,28 - 1,998 * X_1 + 0,9826 * X_2 - 2,347 * X_1^2 + 0,2125 * X_1 * X_2 - 1,776 * X_2^2 \quad (5)$$

$$R_{28} = 75,85 - 2,349 * X_1 + 0,8417 * X_2 - 2,599 * X_1^2 + 0,53 * X_1 * X_2 - 1,972 * X_2^2 \quad (6)$$

Dựa trên các phương trình hàm hồi quy (3), (4), (5) và (6), giá trị tính toán theo hàm mục tiêu - \bar{Y}_i và \bar{Y}_0 đã được xác định và trình bày trong các bảng 5 và 6.

a). Kiểm tra tính có nghĩa của các hệ số b_j của các hàm hồi quy theo chuẩn số Student (t_α (f_2)). Hệ số b_j có nghĩa nếu:

$$t_{b_j} \geq t_\alpha(f_2) \tag{7}$$

Trong đó: (t_α (f_2)) là giá trị tra bảng của chuẩn số Student, với mức độ có nghĩa là $\alpha = 0,05$, bậc tự do lặp lại $f_2 = N \times (k-1) = 13 \times (2-1) = 13$. Tra bảng 3.2 của tài liệu [12] đã thu được $t_{0,05}(13) = 1,7709$.

• Giá trị của chuẩn số Student t_{b_j} đối với hệ số b_j được xác định theo công thức (8):

$$t_{b_j} = \frac{|b_j|}{S_{b_j}} \Rightarrow |b_j| = t_{b_j} \times S_{b_j} \tag{8}$$

• Độ lệch tiêu chuẩn S_{b_j} của phân bố b_j được xác định theo công thức (9) và giá trị ghi trong bảng 5 và 6:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S_{II}^2}{N}} \tag{9}$$

• Trong đó N là tổng số thí nghiệm ($N = 13$) và S_{II}^2 là phương sai lặp, được xác định theo công thức (9) và các trị đã được đưa ra trong bảng 5 và 6.

$$S_{II}^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (Y_{oj} - \bar{Y}_o)^2}{m-1} \tag{9}$$

Trong đó: m - Số thí nghiệm lặp ở tâm ($m = 5$), Y_{oj} - giá trị thu được của thí nghiệm thứ i ở tâm kế hoạch và \bar{Y}_o - giá trị trung bình của các thí nghiệm ở tâm.

Theo tính có nghĩa của chuẩn số Student: $t_{b_j} \geq t_\alpha(f_2)$ trong đó: $t_{b_j} = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}$.

Từ đó thu được $|b_j| \geq t_\alpha(f_2) \times S_{b_j}$. Do đó, hệ số b_j của phương trình hàm hồi quy được coi là có nghĩa, nếu: $|b_j| \geq t_{0,025}(48) \times S_{b_j} = 1,7709 \times S_{b_j}$. Theo giá trị tra bảng của chuẩn số Student, và giá trị S_{b_j} đã được tính toán và liệt kê trong bảng 5 và 6, phương trình hàm hồi quy bậc hai thu gọn về cường độ nén ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày của bê tông hạt mịn tương ứng có dạng:

$$R_3 = 33,64 - 1,107 \times X_1 + 0,6052 \times X_2 - 0,5905 \times X_1^2 - 1,212 \times X_2^2; (R^2 = 0,7837) \tag{10}$$

$$R_7 = 55,45 - 3,035 \times X_1 + 1,673 \times X_2 - 3,108 \times X_1^2 - 3,855 \times X_2^2; (R^2 = 0,8134) \tag{11}$$

$$R_{14} = 69,28 - 1,998 \times X_1 + 0,9826 \times X_2 - 2,347 \times X_1^2 - 1,776 \times X_2^2; (R^2 = 0,7427) \tag{12}$$

$$R_{28} = 75,85 - 2,349 \times X_1 + 0,8417 \times X_2 - 2,599 \times X_1^2 - 1,972 \times X_2^2; (R^2 = 0,8158) \tag{13}$$

b). Kiểm tra tính tương hợp của mô hình theo chuẩn số Fisher. Theo các nghiên cứu [9, 10], tính tương hợp của mô hình thí nghiệm được kiểm tra theo chuẩn số Fisher, theo công thức (14):

$$F_0 = \frac{S_d^2}{S_{\hat{y}}^2} \tag{14}$$

Với S_d^2 là phương sai lập, được xác định theo công thức (9) và các trị đã được đưa ra trong bảng 5 và 6.

$S_{\hat{y}}^2$ là phương sai dư, được xác định theo công thức (15) và các trị cũng đã được trình bày trong bảng 5 và 6.

$$S_{\hat{y}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - B} \tag{15}$$

Trong đó: Y_i ; \hat{Y}_i - giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán của hàm mục tiêu; N - số thí nghiệm ($N=13$) và B - số hệ số có nghĩa trong phương trình hồi quy bậc hai ($B=5$).

Bên cạnh đó $F_{\alpha}(f_1, f_2)$ là giá trị của chuẩn số Fisher, xác định bằng cách tra bảng 3.5 của tài liệu [12] ở mức có nghĩa $\alpha = 0,05$; bậc tự do lập $f_2 = m - 1 = 5 - 1 = 4$; bậc tự do dư $f_1 = N - B = 13 - 5 = 8$. Từ đó đã thu được $F_{0,05}(8, 4) = 6.0410$.

Theo các giá trị của S_d^2 và $S_{\hat{y}}^2$ thu được trong bảng 5 và 6, đã tính toán được giá trị của chuẩn số Fisher đối với các hàm mục tiêu cường độ nén của bê tông ở tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày lần lượt như sau:

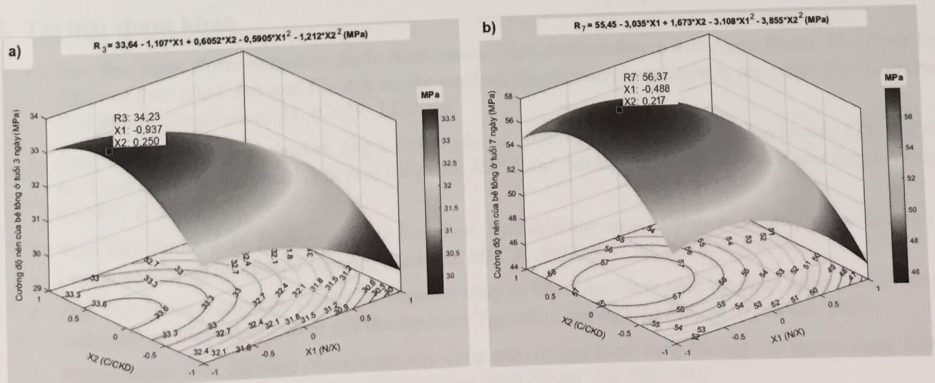
$$F_0^3 = 2,772; F_0^7 = 3,245; F_0^{14} = 1,912 \text{ và } F_0^{28} = 2,169$$

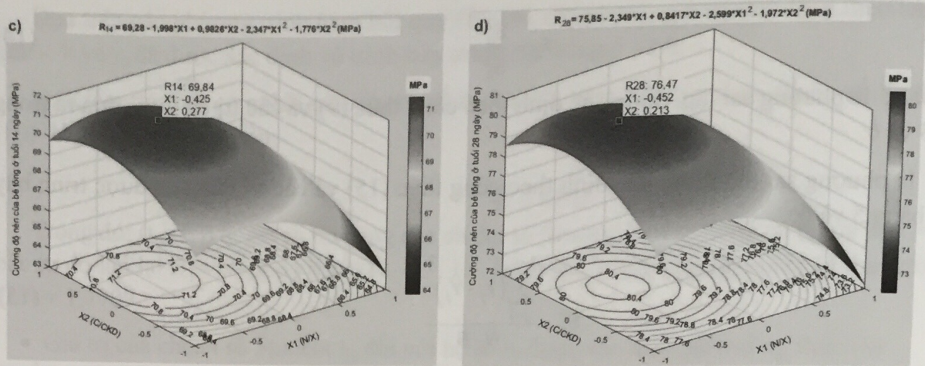
Do F_0^3, F_0^7, F_0^{14} và $F_0^{28} < F_{0,05}(8, 4)$ vậy các mô hình thí nghiệm cường độ nén đã được xác định thông qua các hàm hồi quy bậc hai (3), (4), (5) và (6) là tương hợp với bức tranh thực nghiệm.

Từ các kết quả phân tích bề mặt biểu hiện của các phương trình hồi quy thu gọn (10), (11), (12) và (13) với các hệ số tương quan (R^2), tương ứng, là 0,7837; 0,8134; 0,7427 và 0,8158 đã chỉ ra rằng cả tỷ lệ N/X và C/CKD đều có ảnh hưởng đáng kể đến các giá trị của mô hình thực nghiệm.

c). Biểu diễn bề mặt và các đường đồng mức của phương trình hồi quy

Bằng cách sử dụng phần mềm Matlab, các hình ảnh của bề mặt biểu hiện và đường đồng mức tương ứng của phương trình hồi quy (10), (11), (12) và (13) đã được đưa thể hiện trên Hình 2.





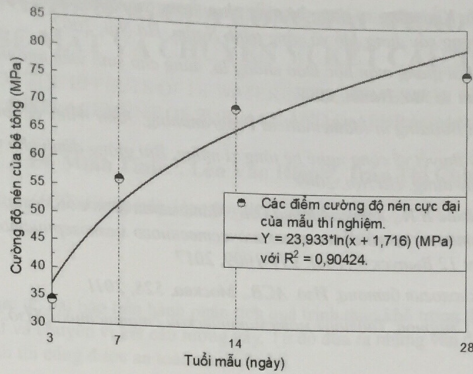
Hình 2: Bề mặt biểu hiện và đường đồng mức của các hàm hồi quy bậc hai:
 a) – (10); b) – (11); c) – (12) và d) – (13)

d). Xác định giá trị cường độ nén lớn nhất của các hàm mục tiêu. Sử dụng phần mềm toán học Maple 13 đã xác định được giá trị cực trị của phương trình hồi quy (10), (11), (12) và (13) và được thể hiện trong bảng 7.

Bảng 7: Giá trị cực đại của các hàm mục tiêu và các biến tương ứng

STT	Giá trị cực đại của các hàm hồi quy	Giá trị của biến mã		Giá trị của biến thực	
		X ₁	X ₂	$\frac{N}{X}$	$\frac{C}{CKD}$
1	Max R ₃ = 34,23 MPa	-0,937	0,250	0,325	1,213
2	Max R ₇ = 56,37 MPa	-0,488	0,217	0,324	1,302
3	Max R ₁₄ = 69,84 MPa	-0,425	0,277	0,326	1,315
4	Max R ₂₈ = 76,47 MPa	-0,452	0,213	0,324	1,310

Tương quan của các điểm cực trị này đã được biểu thị trên hình 3. Mỗi quan hệ giữa cường độ nén cực đại (Y - MPa) và thời gian (x - ngày) này tuân theo quy luật của hàm số Logarit với phương trình hồi quy với hệ số tương quan ($R^2 = 0,90424$) đã được nêu rõ trên hình 3. Từ kết quả phân tích đã cho thấy, mỗi tương quan thu được của bê tông hạt mịn cường độ cao là khá phù hợp với quy luật phát triển cường độ của bê tông phụ thuộc vào tuổi của mẫu, đã được ghi nhận trong nghiên cứu trước đó [11].



Hình 3: Tương quan giữa cường độ nén cực đại và thời gian

4. Kết luận và kiến nghị

Từ một số kết quả nghiên cứu thu được trong phạm vi trên, rút ra một số kết luận như sau:

- Đối với bê tông phun hạt mịn có cường độ cao sử dụng phụ gia siêu mịn Silicafum SF-90 và tro đáy loại F, phụ gia siêu dẻo SR 5000F «SilkRoad», cốt liệu nhỏ là cát vàng có chất lượng tốt và xi măng Pooc lăng SEM I 42,5 N Holcim, quan hệ bậc hai giữa cường độ nén ở tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày với các biến X_1 (N/X) và X_2 (C/CKD) đã được mô phỏng bằng các hàm hồi quy (10), (11), (12) và (13). Các hàm hồi quy này là tương hợp với bức tranh thực nghiệm.

- Sử dụng chương trình toán học Matlab và Maple đã biểu diễn được các bề mặt biểu hiện và đường đồng mức của mô hình thực nghiệm, đồng thời đã xác định được giá trị lớn nhất của cường độ nén ở 3, 7, 14 và 28 ngày của bê tông.

- Tương quan giữa cường độ nén của bê tông phun hạt mịn cường độ cao theo thời gian tuân theo quy luật của hàm số Logarit với hệ số tương quan $R^2 = 0,90424$ và khá phù hợp với quy luật phát triển cường độ của bê tông phụ thuộc vào tuổi của mẫu.

Kiến nghị: Có thể sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai để nghiên cứu tiếp các tính chất quan trọng khác của bê tông phun như: độ chảy của hỗn hợp bê tông, thời gian đông kết của hỗn hợp bê tông, thời gian phun bê tông hợp lý, phương pháp phun...

5. Tài liệu tham khảo

1. Lam Van Tang, Boris Bulgakov, Sofia Bazhenova, Olga Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Tho Dinh Vu, *Effect of Rice Husk Ash and Fly Ash on the workability of concrete mixture in the High-Rise Construction*, E3S Web of Conferences 33, 02029, 13, 2018.
2. Lam Van Tang, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Yuri Mikhaylovich, *Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 365, 032007, 8, 2018.
3. Фам Дик Тханг, Б.И. Булгаков, Танг Ван Лам, *Применение мелкозернистого торкрет-бетона для строительства туннелей метро*, Вестник МГСУ, №07, 81 – 90, 2016.
4. Đào Viết Đoàn, Tăng Văn Lâm, *Các tham số công nghệ và lựa chọn phương pháp kiểm tra hiện trường cường độ bê tông phun chống giữ đường hầm*, Tạp chí Công nghiệp Mỏ, số 01, 24-28, 2017.
5. Phùng Mạnh Đắc, *Bê tông phun trong xây dựng mỏ với quá trình tăng trưởng của ngành than*, Công nghệ bê tông phun trong xây dựng Mỏ và công trình Ngầm, Hà Nội, 2002.

6. Nguyễn Quang Phích, *Khả năng sử dụng bê tông phun trong xây dựng công trình ngầm và mỏ, Công nghệ bê tông phun trong xây dựng Mỏ và công trình Ngầm, Hà Nội, 2002.*
7. Đặng Trung Thành, *Bài giảng môn học Đào chống lò, dùng cho sinh viên ngành khai thác hầm lò, Bộ môn Công trình Ngầm và Mỏ, Hanoi, 2007.*
8. H.P. Williams, *Model Building in Mathematical Programming, John Wiley & Sons (2013).*
9. Nguyễn Như Quý, *Lý thuyết về công nghệ bê tông xi măng, Bài giảng dành cho Cao học Vật liệu Xây dựng, Trường ĐH Xây dựng, Hà Nội, 2009.*
10. Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В, *Математическое моделирование влияния сырьевых компонентов на прочность высококачественного мелкозернистого бетона при сжатии, Вестник МГСУ, Том 12 Выпуск 9 (108), 999-1009, 2017*
11. Ю.М. Баженов, *Технология бетона, Изд. АСВ., Москва, 528, 2011.*
12. Л.Н. Бажиев, Н.В. Смирнов, *Таблицы математической статистики. Изд., Наука, Москва, 416, 1983.*