

УДК 691

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГНОЗОВАНОЇ МІЦНОСТІ БЕТОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Ю. С. Бікс

CONCRETE STRENGTH PREDICTION BY USING FUZZY LOGIC

Y. Biks

У статті наведено методологію визначення прогнозованої міцності бетонного зразка на стиск на базі апарату нечіткої логіки. Запропонована низка факторів (В/Ц, витрата в'яжучого, мілкого та крупного заповнювача, коефіцієнт ущільнення суміші), що впливають на прогнозовану міцність бетонного зразка на стиск. Виконано розрахунок дефазифікації в математичній моделі прогнозування міцності за методом центра ваги. Показано, що значення прогнозованої міцності бетонного зразка, отримана за методом нечіткої логіки, достатньо добре корелюється з експериментальними даними випробувань. Відносна похибка при визначенні прогнозованої величини міцності для зазначеного складу суміші складає 8,62 %.

В статье приведена методология определения прогнозируемой прочности бетонного образца на сжатие на базе аппарата нечеткой логики. Предложен ряд факторов (В/Ц, расход вяжущего, мелкого и крупного заполнителей, коэффициент уплотнения смеси) которые влияют на прогнозируемую прочность бетонного образца на сжатие. Выполнен расчет дефазификации в математической модели прогнозирования прочности по методу центра тяжести. Показано, что значение прогнозированной прочности бетонного образца, полученный по методу нечеткой логики достаточно хорошо коррелирует с экспериментальными данными испытаний. Относительная погрешность при определении прогнозируемой величины прочности для приведенного состава смеси составляет 8,62 %.

The paper describes the methodology for the predicted strength determining of compression concrete on the basis of fuzzy logic. A number of the weightiest factors (W/C, cement, fine and coarse withdrawal, compression ratio) which impacts on predicted concrete's compression strength are proposed. Defuzzification calculation in a mathematical model of strength prediction is performed by center of gravity method. It is shown that the strength forecasting value of a concrete sample obtained by the fuzzy logic method is well correlated with experimental data tests. The relative error for the predicted value of the strength for indicated mixture is 8,62 %.

Вступ

За останні п'ятнадцять років за кордоном [1-3], а також останнім часом в Україні та країнах СНД, для прогнозування характеристик бетону, зокрема міцності, використовуються методики, які поряд з відомими методами регресійного аналізу, неруйнівних експрес-методів контролю за бетоном [4-7], базуються на апараті нечіткої логіки при підборі складу бетону на заводах виробників товарного бетону та залізобетонних виробів [8-12]. Це обумовлюється тим, що реагування на ринковий попит потребує гнучкого підходу щодо приготування та рецептурного складу бетону. Необхідну рецептуру бетону із певними міцнісними характеристиками складно швидко отримати у лабораторії. Одним із ефективних методів проектування бетону із заданою величиною міцності на стиск є математичне моделювання, зокрема на базі нечіткої логіки [9-12].

Метою роботи є методологія визначення прогнозованої міцності бетону із використанням апарату нечіткої логіки.

Основна частина

Ієрархічна класифікація параметрів запропонованої моделі [14] виконана у вигляді дерева логічного висновку, яке визначає систему вкладених одне в одне висловлювань-знань меншої розмірності. Проектна прогнозована міцність бетонного виробу (рис. 1) є функцією вигляду

$Y = f(x_9, x_{10}, y_1, y_2)$, в якій зв'язок входів (x_i, y_i) з виходом (Y) замінюється послідовністю співвідношень:

$$Y = f_{(Y)}(x_9, x_{10}, y_1, y_2); \quad (1)$$

$$y_1 = f_{(y_1)}(x_1, x_2, x_3); \quad (2)$$

$$y_2 = f_{(y_2)}(x_4, x_5, x_6, x_7, x_8), \quad (3)$$

де y_1, y_2 – укрупнені значення лінгвістичних змінних, що характеризують параметри впливу на прогнозовану проектну міцність бетонного виробу, а сааме: y_1 – пластичності, y_2 – витрати компонентів та фактори впливу: x_1 – В/Ц суміші, x_2 – витрата золи-виносу; x_3 – витрата суперпластифікатора; x_4 – витрата цементу; x_5 – витрата доменного шлаку; x_6 – витрата води; x_7 – витрата щебеню; x_8 – витрата піску; x_9 – вік бетону; x_{10} – коефіцієнт ущільнення.

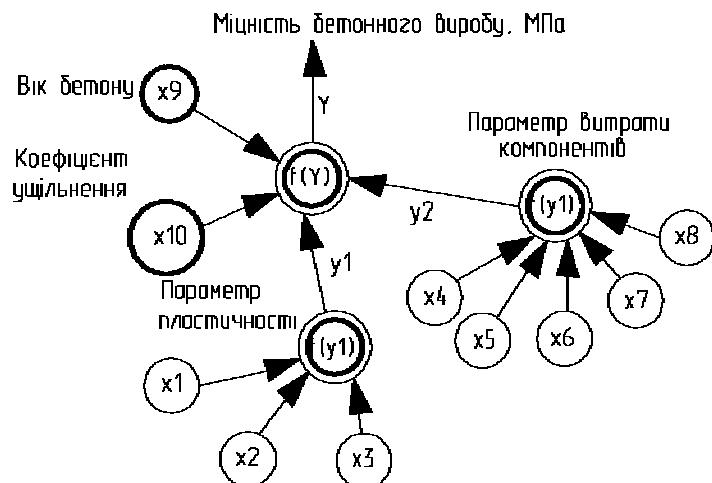


Рис. 1. Ієрархічне дерево логічного висновку адаптованої моделі проектування бетонного виробу з прогнозованою міцністю

Кожний з факторів, які враховані у моделі, має свій діапазон та оцінюється нечітким термом лінгвістичної змінної (табл. 1)

Фактори впливу як лінгвістичні змінні

Таблиця 1

Фактори впливу як лінгвістичні змінні				
Параметри	Позначення та назва лінгвістичної змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки	
Пластично-сті	x_1 – В/Ц суміші	0,35...0,5	низьке, середнє, високе	
	x_2 – витрата золи-виносу, кг	10...200	низька, середня, висока	
	x_3 – витрата суперпластифікатора, % від маси цементу	1...3,75	низька, середня, висока	
Витрати компонентів	x_4 – витрата цементу, кг	100...450	низька, середня, висока	
	x_5 – витрата доменного шлаку, кг	10...360	низька, середня, висока	
	x_6 – витрата води, кг	120...250	низька, середня, висока	
	x_7 – витрата щебеню, кг	800...1150	низька, середня, висока	
	x_8 – витрата піску, кг	590...1000	низька, середня, висока	
	x_9 – вік бетону, діб	3...28	низький, середній, високий	
	x_{10} – коефіцієнт ущільнення	0,85...0,98	низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий	

В наведеній моделі (рис. 1, табл. 1) всі лінгвістичні змінні (ЛЗ) [10] кількісні (витрата води, цементу, щебеню тощо). Математичну модель подано саме такими факторами впливу (ЛЗ), тому що для цієї моделі існує великий масив статистичної інформації (даних випробувань) [1].

Кожний з термів для оцінки ЛЗ подано на шкалі з відповідними значеннями по осі абсцис (рис. 2) та описано функцією принадлежності, наприклад, яка обрана з вбудованої бібліотеки функцій належності пакету “Fuzzy logic Toolbox” комплексу MATLAB. Для даної задачі вибрано дзвоноподібну функцію належності, яка описується рівнянням

$$\mu_t(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c}\right)^2}, \quad (4)$$

де b – координата максимуму;

c – коефіцієнт концентрації.

Для ілюстрації використано інтерфейс комплексу MATLAB, на прикладі заповнення ЛЗ “В/Ц” (рис. 2).

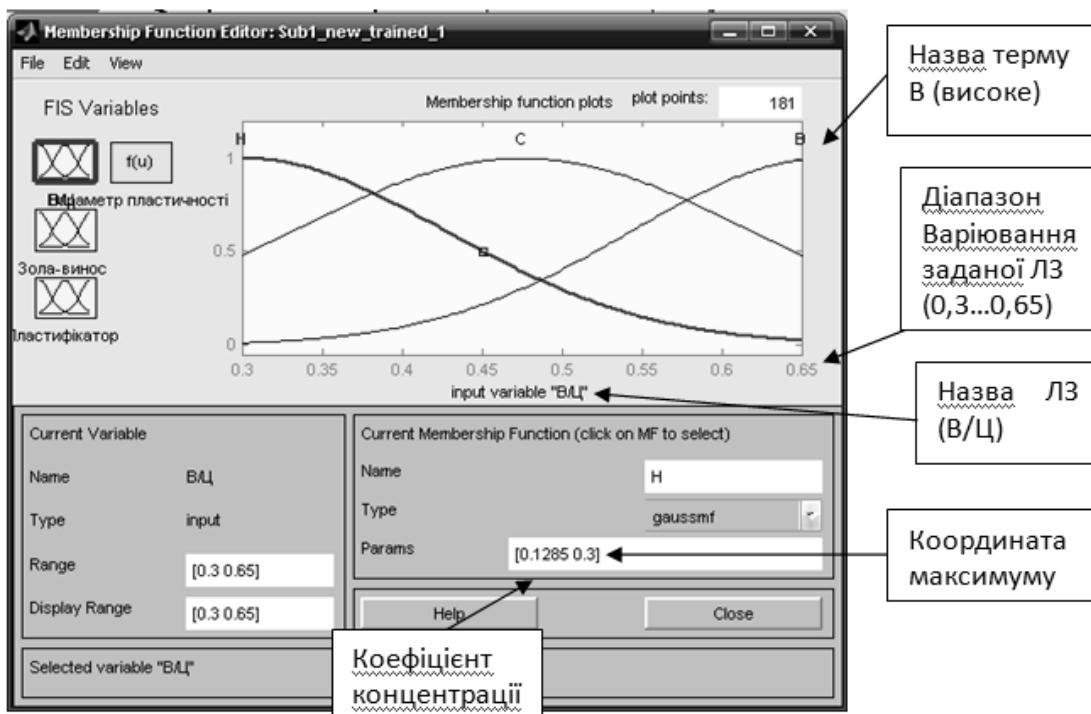


Рис. 2. Інтерфейс встановлення функцій належності

Для побудови функцій належності необхідно знайти параметри b та c для кожного з термів. Отримані значення (рис. 2) для всіх термів наведено у табл. 2.

Після експертного завдання діапазону для кожної конкретної ЛЗ своїх функцій належності, побудовано бази знань (табл. 3...5) типу ”ЯКЩО – ТО”, що віддзеркалюють знання експерта про взаємозв’язок вхідних параметрів з вихідною цільовою функцією.

Нечіткою базою знань називається сукупність нечітких правил <ЯКЩО – ТО>, які віддзеркалюють взаємозв’язок між входами та виходом досліджуваного об’єкта. Формат нечітких правил такий: ЯКЩО <антecedent правила>, ТО <консеквент правила> [15].

Антecedент правила “АБО” являє собою твердження типу « x є високим», де «високий» – це терм, що заданий нечіткою множиною на універсальній множині лінгвістичної змінної x . Консеквент правила – це твердження типу « $Rb \in d$ ». Для задач прогнозування міцності бетону значення вихідної змінної задається в одиницях міцності (наприклад $Rb = 50$ МПа).

Багатовимірні залежності “параметри стану – прогнозована міцність” доцільно задавати нечіткими правилами з логічними операціями “ТА” і “АБО”. Правила зручно формувати так, щоб всередині змінні поєднувалися по “ТА”, а в базі знань правила з’єднувались логічною операцією “АБО”. В цьому випадку діагностична база знань про зв’язок параметрів стану $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ з

прогнозованою міцністю D задається таким чином:

$$\text{ЯКЩО} \begin{cases} x_1 = a_1^{j1} \text{ та } x_2 = a_2^{j1} \text{ та ... та } x_n = a_n^{j1} \text{ з вагою } w_{j1}, \text{ або} \\ x_1 = a_1^{j2} \text{ та } x_2 = a_2^{j2} \text{ та ... та } x_n = a_n^{j2} \text{ з вагою } w_{j2}, \text{ або} \\ \dots \\ x_1 = a_1^{jk_j} \text{ та } x_2 = a_2^{jk_j} \text{ та ... та } x_n = a_n^{jk_j} \text{ з вагою } w_{jk_j}, \end{cases}$$

$$\text{ТО } \{D = d_j \mid j = \overline{1, m},$$

де a_i^{jp} – нечіткий терм, що оцінює значення фактора x_i в правилі з номером jp ;

d_j – класи розв'язків (прогнозована міцність бетону);

m – кількість можливих класів рішень;

jk – число правил, в яких $D = dj$, $j = \overline{1, m}$;

$w_{jp} \in [0, 1]$ – ваговий коефіцієнт, який відповідає впевненості експерта в достовірності правила з номером jp , $j = \overline{1, m}$; $p = \overline{1, k_j}$;

Таблиця 2

Параметри функцій належності (за формулою 4)

Параметр	Терми	Параметри функцій належності	
		b	c
x_1	низьке	0,2	0,55
	середнє	0,4	0,65
	високе	0,65	0,65
x_2	низький	10	60
	середній	100	65
	високий	200	60
x_3	низький	1,0	1,0
	середній	1,87	1,32
	високий	3,75	0,98
x_4	низький	100	160
	середній	300	165
	високий	550	160
x_5	низький	10	90
	середній	180	110
	високий	360	90
x_6	низький	120	65
	середній	190	75
	високий	250	65
x_7	низький	800	105
	середній	950	115
	високий	1150	105
x_8	низький	590	165
	середній	800	200
	високий	1000	165
x_9	низький	3,0	5,0
	середній	14	16
	високий	28	10
x_{10}	низький	0,8	0,02
	нище середнього	0,85	0,02
	середній	0,89	0,03
	вище середнього	0,94	0,02
	високий	0,98	0,02

Нечітку базу знань подають таблицею, яку ще називають матрицею знань (табл. 3-5). За допомогою операцій (АБО) і (ТА) нечітку базу записують у компактній формі:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \text{ з вагою } w_{jp} \right] \rightarrow D = d_j, \quad j = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Для переходу від нечіткої бази знань (5) до системи нечітких логічних рівнянь введемо такі позначення [15]:

$\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$ – функція належності змінної x_i до нечіткого терма a_i^{jp} ($j = \overline{1, m}$, $p = \overline{1, k_j}$, $i = \overline{1, n}$);
 $\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функція належності вектора параметрів (x_1, x_2, \dots, x_n) до розв'язку d_j , $j = \overline{1, m}$.

Зв'язок між цими функціями подається ізоморфною до нечіткої бази знань системою нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left(w_{pj} \cdot \bigwedge_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right), \quad j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

де \vee (\wedge) - операція максимуму (мінімуму).

Бази знань, що відповідають рівнянням (1...3) наведено у табл. 3...5.

Таблиця 3

База знань для лінгвістичної змінної Y

Прогнозована міцність бетону				To
Якщо				
Вік бетону, (x ₉)	Коефіцієнт ущільнення, (x ₁₀)	Укрупнений параметр (y ₁)	Укрупнений параметр (y ₂)	Y
H	H	H	H	H
H	hC	H	C	
C	hC	C	H	
H	H	B	H	
H	hC	C	B	
B	C	C	C	C
C	C	B	C	
B	C	B	H	
B	vC	C	B	
B	vC	B	B	B
B	B	H	B	
C	B	B	B	

Таблиця 4

База знань для лінгвістичної змінної y₁

Параметр пластичності y ₁			To
Якщо			
B/П, (x ₁)	Зола-винос, (x ₂)	Витрата суперпластифікатора, % від маси цементу (x ₃)	y ₁
H	H	H	H
H	C	H	
C	H	H	
C	C	H	C
B	C	H	
C	B	H	
H	H	B	B
C	H	C	
H	B	B	
H	B	C	

Таблиця 5

База знань для лінгвістичної змінної y_2

Параметр пропорційності складу бетонної суміші y_2					To
Якщо					
Цемент(x_4)	Доменний шлак(x_5)	Вода(x_6)	Щебінь(x_7)	Пісок(x_8)	y ₂
H	H	B	C	B	
H	C	B	H	C	
H	H	C	H	B	
C	C	C	B	C	C
C	B	C	C	C	
C	C	H	B	C	
C	C	H	B	C	B
C	B	B	B	C	
B	B	C	B	B	
C	B	C	C	B	B
B	C	C	B	C	
B	B	H	B	C	

Математичною моделлю діагностування є система нечітких логічних рівнянь за формулою (6). Перед формуванням системи нечітких логічних рівнянь для прогнозування міцності бетонного виробу необхідно врахувати такі особливості баз знань (табл. 3 – 5), як рівність одиниці вагових коефіцієнтів усіх правил. Значення вагових коефіцієнтів усіх правил дорівнює одиниці, тому для зручності вагові коефіцієнти можна вилучити з усіх логічних рівнянь.

За базою знань з табл. 3 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення прогнозованої величини міцності бетонного виробу, що відповідає співвідношенню (1). Для компактності запису операція "Λ" позначена (·):

$$\begin{aligned} \mu_H(Y) = & \mu_H(x_9) \cdot \mu_H(x_{10}) \cdot \mu_H(y_1) \cdot \mu_H(y_2) \vee \mu_H(x_9) \cdot \mu_{HC}(x_{10}) \cdot \mu_H(y_1) \cdot \mu_C(y_2) \vee \\ & \vee \mu_C(x_9) \cdot \mu_{HC}(x_{10}) \cdot \mu_C(y_1) \cdot \mu_H(y_2) \vee \mu_H(x_9) \cdot \mu_H(x_{10}) \cdot \mu_B(y_1) \cdot \mu_H(y_2) \vee \\ & \vee \mu_H(x_9) \cdot \mu_{HC}(x_{10}) \cdot \mu_C(y_1) \cdot \mu_B(y_2); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mu_H(Y) = & \mu_B(x_9) \cdot \mu_C(x_{10}) \cdot \mu_C(y_1) \cdot \mu_C(y_2) \vee \mu_C(x_9) \cdot \mu_C(x_{10}) \cdot \mu_B(y_1) \cdot \mu_C(y_2) \vee \\ & \vee \mu_B(x_9) \cdot \mu_C(x_{10}) \cdot \mu_B(y_1) \cdot \mu_H(y_2) \vee \mu_C(x_9) \cdot \mu_C(x_{10}) \cdot \mu_C(y_1) \cdot \mu_B(y_2); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu_H(Y) = & \mu_B(x_9) \cdot \mu_{BC}(x_{10}) \cdot \mu_C(y_1) \cdot \mu_B(y_2) \vee \mu_B(x_9) \cdot \mu_{BC}(x_{10}) \cdot \mu_B(y_1) \cdot \mu_B(y_2) \vee \\ & \vee \mu_B(x_9) \cdot \mu_B(x_{10}) \cdot \mu_B(y_1) \cdot \mu_B(y_2) \vee \mu_C(x_9) \cdot \mu_B(x_{10}) \cdot \mu_B(y_1) \cdot \mu_B(y_2). \end{aligned} \quad (9)$$

За базою знань з табл. 3 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення укрупненого параметра пластичності y_1 , що відповідає співвідношенню (2):

$$\mu_H(y1) = \mu_H(x_1) \cdot \mu_H(x_2) \cdot \mu_H(x_3) \vee \mu_H(x_1) \cdot \mu_C(x_2) \cdot \mu_H(x_3) \vee \mu_C(x_1) \cdot \mu_H(x_2) \cdot \mu_H(x_3); \quad (10)$$

$$\mu_C(y1) = \mu_C(x_1) \cdot \mu_C(x_2) \cdot \mu_H(x_3) \vee \mu_B(x_1) \cdot \mu_C(x_2) \cdot \mu_H(x_3) \vee \mu_C(x_1) \cdot \mu_B(x_2) \cdot \mu_H(x_3); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y1) = & \mu_H(x_1) \cdot \mu_H(x_2) \cdot \mu_B(x_3) \vee \mu_C(x_1) \cdot \mu_H(x_2) \cdot \mu_C(x_3) \vee \\ & \vee \mu_H(x_1) \cdot \mu_B(x_2) \cdot \mu_B(x_3) \vee \mu_H(x_1) \cdot \mu_B(x_2) \cdot \mu_C(x_3). \end{aligned} \quad (12)$$

За базою знань з табл. 4 запишемо нечіткі логічні рівняння для визначення укрупненого параметра витрати y_2 , що відповідає співвідношенню (3):

$$\begin{aligned} \mu_H(y2) = & \mu_H(x_4) \cdot \mu_H(x_5) \cdot \mu_B(x_6) \cdot \mu_C(x_7) \cdot \mu_B(x_8) \vee \mu_H(x_4) \cdot \mu_C(x_5) \cdot \mu_B(x_6) \cdot \mu_H(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \\ & \vee \mu_H(x_4) \cdot \mu_H(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_H(x_7) \cdot \mu_B(x_8); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(y2) = & \mu_C(x_4) \cdot \mu_C(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \mu_C(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_C(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \\ & \vee \mu_C(x_4) \cdot \mu_C(x_5) \cdot \mu_H(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y2) = & \mu_C(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_B(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \mu_B(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_B(x_8) \vee \\ & \vee \mu_C(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_C(x_7) \cdot \mu_B(x_8) \vee \mu_B(x_4) \cdot \mu_C(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \\ & \vee \mu_B(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_H(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8). \end{aligned} \quad (15)$$

Проілюструємо використання запропонованих моделей та алгоритму на прикладі визначення прогнозованої міцності. Значення однієї комбінації вхідних параметрів реального складу бетонної суміші, взятого з експериментальної вибірки для задачі прогнозування міцності, наведено в першій графі табл. 6. Значення ступенів належності значень параметрів стану нечітким термам, знайдені за формулою (4), зведено в табл. 6.

Таблиця 6

Обчислені значення функцій належності

x_1	0,62	$\mu_i(x_1) = 0,632$	$\mu_{\tilde{N}}(x_1) = 0,897$	$\mu_{\tilde{A}}(x_1) = 0,998$
x_2	24,5	$\mu_i(x_2) = 0,945$	$\mu_{\tilde{N}}(x_2) = 0,426$	$\mu_{\tilde{A}}(x_2) = 0,105$
x_3	3,2	$\mu_i(x_3) = 0,171$	$\mu_{\tilde{N}}(x_3) = 0,498$	$\mu_{\tilde{A}}(x_3) = 0,760$
x_4	213,7	$\mu_i(x_4) = 0,664$	$\mu_{\tilde{N}}(x_4) = 0,785$	$\mu_{\tilde{A}}(x_4) = 0,185$
x_5	98,1	$\mu_i(x_5) = 0,511$	$\mu_{\tilde{N}}(x_5) = 0,643$	$\mu_{\tilde{A}}(x_5) = 0,106$
x_6	131,7	$\mu_i(x_6) = 0,969$	$\mu_{\tilde{N}}(x_6) = 0,623$	$\mu_{\tilde{A}}(x_6) = 0,232$
x_7	1065,8	$\mu_i(x_7) = 0,135$	$\mu_{\tilde{N}}(x_7) = 0,497$	$\mu_{\tilde{A}}(x_7) = 0,609$
x_8	785,4	$\mu_i(x_8) = 0,416$	$\mu_{\tilde{N}}(x_8) = 0,995$	$\mu_{\tilde{A}}(x_8) = 0,372$
x_9	28	$\mu_i(x_9) = 0,038$	$\mu_{\tilde{N}}(x_9) = 0,566$	$\mu_{\tilde{A}}(x_9) = 1,000$
x_{10}	0,8	$\mu_i(x_{10}) = 0,038$ = 1,000	$\mu_{\tilde{N}}(x_{10}) = 0,100$	$\mu_{\tilde{A}}(x_{10}) = 0,020$
		$\mu_{i,\tilde{N}}(x_{10}) = 0,138$		$\mu_{\tilde{A}}(x_{10}) = 0,012$

Підставляючи значення функцій належності (табл. 5) у нечіткі логічні рівняння (3), що визначають параметр витрати компонентів, знаходимо:

$$\begin{aligned} \mu_H(y2) &= 0,664 \cdot 0,511 \cdot 0,232 \cdot 0,497 \cdot 0,372 \vee 0,664 \cdot 0,643 \cdot 0,232 \cdot 0,135 \cdot 0,995 \vee \\ &\vee 0,664 \cdot 0,511 \cdot 0,623 \cdot 0,135 \cdot 0,372 = 0,664; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(y2) &= 0,785 \cdot 0,643 \cdot 0,623 \cdot 0,609 \cdot 0,995 \vee 0,785 \cdot 0,106 \cdot 0,623 \cdot 0,497 \cdot 0,995 \vee \\ &\vee 0,785 \cdot 0,643 \cdot 0,969 \cdot 0,609 \cdot 0,995 = 0,995; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y2) &= 0,785 \cdot 0,106 \cdot 0,232 \cdot 0,609 \cdot 0,995 \vee 0,185 \cdot 0,106 \cdot 0,623 \cdot 0,609 \cdot 0,372 \vee \\ &\vee 0,785 \cdot 0,106 \cdot 0,623 \cdot 0,497 \cdot 0,372 \vee 0,185 \cdot 0,643 \cdot 0,623 \cdot 0,609 \cdot 0,995 \vee \\ &\vee 0,185 \cdot 0,106 \cdot 0,969 \cdot 0,609 \cdot 0,995 = 0,623. \end{aligned} \quad (18)$$

Підставляючи значення функцій належності (табл. 5) у нечіткі логічні рівняння (2), що визначають параметр пластичності, знаходимо:

$$\mu_H(y1) = 0,632 \cdot 0,945 \cdot 0,171 \vee 0,632 \cdot 0,426 \cdot 0,171 \vee 0,897 \cdot 0,945 \cdot 0,171 = 0,632; \quad (19)$$

$$\mu_C(y1) = 0,897 \cdot 0,426 \cdot 0,171 \vee 0,998 \cdot 0,426 \cdot 0,171 \vee 0,897 \cdot 0,105 \cdot 0,171 = 0,897; \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y1) &= 0,632 \cdot 0,945 \cdot 0,760 \vee 0,897 \cdot 0,945 \cdot 0,498 \vee \\ &\vee 0,632 \cdot 0,105 \cdot 0,760 \vee 0,632 \cdot 0,105 \cdot 0,498 = 0,632. \end{aligned} \quad (21)$$

Підставляючи значення функцій належності (табл. 5) у нечіткі логічні рівняння (1), що визначають прогнозовану міцність бетонного виробу, знаходимо:

$$\begin{aligned} \mu_H(Y) &= 0,038 \cdot 1,0 \cdot 0,632 \cdot 0,664 \vee 0,038 \cdot 1,0 \cdot 0,632 \cdot 0,995 \vee 0,566 \cdot 0,138 \cdot 0,897 \cdot 0,664 \vee \\ &\vee 0,038 \cdot 1,0 \cdot 0,632 \cdot 0,664 \vee 0,038 \cdot 0,138 \cdot 0,897 \cdot 0,623 = 0,897; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\mu_C(Y) = 1,0 \cdot 0,1 \cdot 0,897 \cdot 0,995 \vee 0,566 \cdot 0,1 \cdot 0,632 \cdot 0,995 \vee 1,0 \cdot 0,1 \cdot 0,632 \cdot 0,664 = 0,664; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(Y) &= 1,0 \cdot 0,02 \cdot 0,897 \cdot 0,623 \vee 1,0 \cdot 0,02 \cdot 0,632 \cdot 0,623 \vee \\ &\vee 1,0 \cdot 0,012 \cdot 0,632 \cdot 0,623 \vee 0,566 \cdot 0,012 \cdot 0,632 \cdot 0,623 = 0,632. \end{aligned} \quad (24)$$

Дефазифікація (розшифровка) нечіткого висновку виконана методом центра ваги [14]:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(Y) \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(Y)}, \quad (25)$$

де μ_i – відповідне значення функції належності для цільової функції Y – прогнозована величина міцності бетонного виробу (рівняння 22...24);

di – значення абсциси цільової функції із заданого інтервалу (2...90 МПа) у вікні комплексу MATLAB (рис. 3).

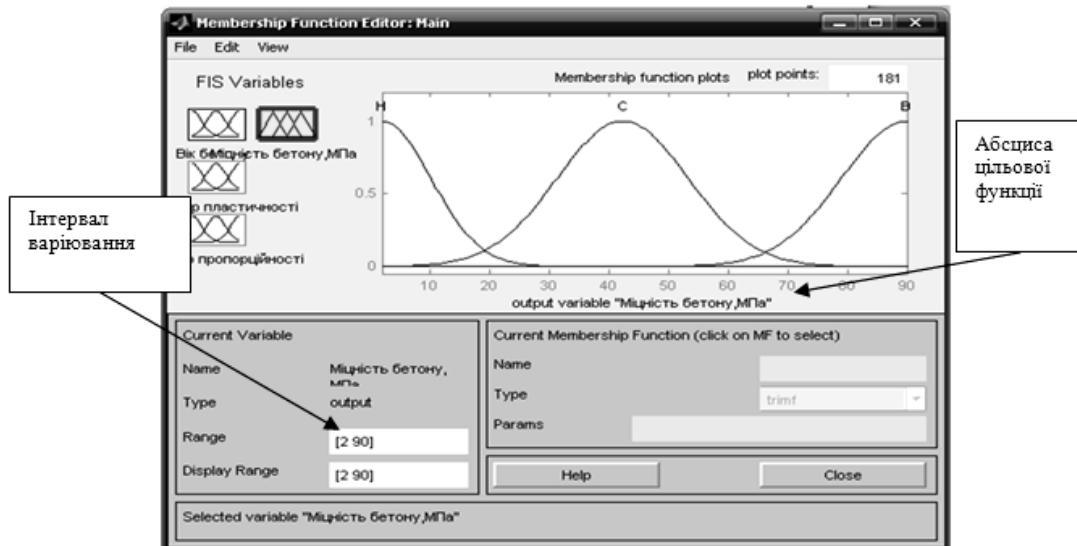


Рис. 3. Лінгвістична змінна “Міцність бетону” з інтервалом варіювання

Тоді, відповідно до формули (25)

$$Y_{\text{прогноз}} = \frac{0,897 \cdot 2 + 0,995 \cdot 47 + 0,632 \cdot 90}{0,897 + 0,995 + 0,632} = 41,77 \text{ (МПа)}$$

Причому фактична міцність даного складу суміші $Rb_{\text{фактичне}} = 45,71$ (МПа). Відносна похибка

$$\delta = \frac{Y_{\text{фактичне}} - Y_{\text{прогноз}}}{Y_{\text{фактичне}}} \cdot 100\% = \frac{45,71 - 41,77}{45,71} \cdot 100\% = 8,62 \text{ \%}$$

Таким чином запропонована автором математична модель прогнозування міцності бетонного зразка дозволяє прогнозувати міцність бетонного виробу, а також скоротити час, витрату матеріалів та грошових коштів.

Висновки

- Разом із загальновідомими методами прогнозування характеристики міцності бетону, які базуються на статистико-емпіричних залежностях, а також регресійному аналізі запропонований підхід щодо оцінювання прогнозованої міцності бетонного зразку дозволяє більш повно охопити низку домінуючих факторів причому як кількісних, так і якісних, які чинять вплив на кінцеву характеристику. Величина отриманої похибки свідчить про прийнятну для технологічних розрахунків складу бетону величину варіювання.

Використана література

1. I-Cheng Y. Modeling of strength of high performance concrete using artificial neural networks./Yeh I-Cheng// Cement and Concrete Research. – 1998. – Vol. 28, No. 12, – pp. 1797-1808.
2. N. Hong-Guang and J.-Z. Wang, "Prediction of compressive strength of concrete by neural networks," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 8, pp. 1245-1250, 2000.
3. Noorzaei J., Hakim S.J.S., Jaafar M.S., Thanoon W.A.M. "Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network", *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 2, 2007, pp. 141-153.
4. Дворкин Л. И. Проектирование составов бетонов с заданными свойствами / Л. Дворкин, О. Дворкин. – Ровно: Изд-во РГТУ, 1999. – 202 с.
5. Файнер М. Ш. Экспресс-контроль качества бетона / Файнер М. Ш. – К. – Черновцы: НИИСК-

- НПФ “Композит”, 1997. – 88 с.
6. Прогнозирование в материаловедении: материалы к 41-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов- МОК’41. (Одесса, 25-26 апреля 2002 г.) / гл. ред. В. А. Вознесенский. – Международная инженерная академия, Одесская гос. академия строительства и архитектуры, Одесский дом ученых. – Одесса: Астропринт, 2002. – 195 с.
 7. Міхеєв І. А. Підвищення ефективності рецептурних рішень в технології товарного бетону методами математичного планування : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.. техн.. наук : спец. 05.23.05 “Будівельні матеріали та вироби” / І. А. Міхеєв. – Х., 2012. – 20 с.
 8. Журавльов Ю. В. Автоматизоване управління виробництвом залізобетонних виробів на основі нечіткої логіки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.07 – “Автоматизація технологічних процесів” / Ю. В. Журавльов. – К., 2005. – 20 с.
 9. Лихачев Д. В. Автоматизация процесса преоктирования составов бетонных смесей и их корректировка на основе прогнозирования качества будущего бетона с использованием чётких и нечетких моделей: дис. ... кандидата техн. наук : 05.13.06 / Лихачев Денис Валерьевич. – Орёл, 2004. – 148 с.
 10. Бікс Ю. С. Прогнозування міцності бетону при використанні лінгвістичних змінних апарату нечіткої логіки. [Електронний ресурс] / Ю. С. Бікс // Наукові праці ВНТУ, 2011 № 1. – Режим доступу до журналу: http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_1/2011-1.htm
 11. Прогнозування міцності бетону на базі апарату нечіткої логіки за допомогою MATLAB 7: матеріали четвертої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених [“Геодезія, архітектура та будівництво 2011”], (Львів, 24-26 жовт. 2011р.) / М-во освіти науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т “Львівська політехніка” – Львів, 2011. – 167 с.
 12. Бікс Ю. С. Побудова функцій належності нечітких оцінок впливу параметрів моделі на прогнозовану міцність бетону / Ю. С. Бікс // Вісн. Хмельницького нац. ун-ту. – 2010. – № 5. – С. 137-141.
 13. Бікс Ю. С. Прогнозування міцності та розподілу бокового тиску при виробництві пресованих бетонних дорожніх каменів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.05 – “Будівельні матеріали та вироби” / Ю. С. Бікс. – К., 2013. – 20 с.
 14. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 201 с.
 15. Панкевич О. Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 108 с.

Бікс Юрій Семенович – к.т.н., асистент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.