

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'язучого, мілкового та крупного заповнювача, коефіцієнт ущільнення суміші), що впливають на прогнозовану міцність бетонного зразка на стиск. Виконано розрахунок дефаззифікації 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 статті приведена методологія 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 дефаззификации 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:

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

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

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

де y_1, y_2 – укрупнені значення лінгвістичних змінних, що характеризують параметри впливу на прогнозовану проектну міцність бетонного виробу, а саме: 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.

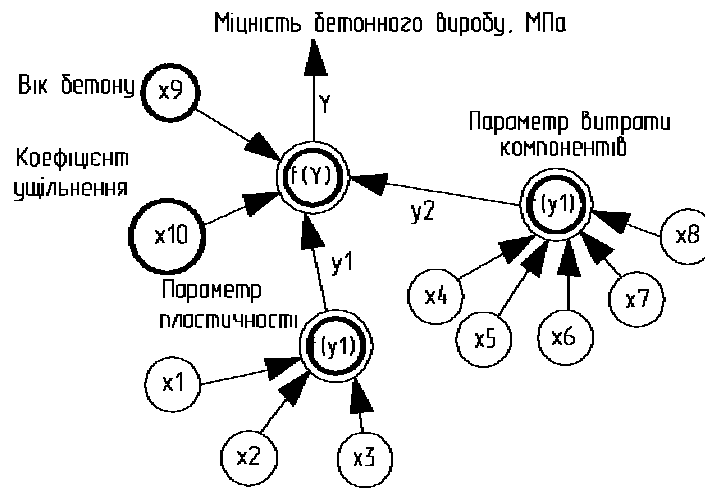


Рис. 1. Ієрархічне дерево логічного висновку адаптованої моделі проектування бетонного виробу з прогнозованою міцністю

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

Таблица 1

Фактори впливу як лінгвістичні змінні

Параметри	Позначення та назва лінгвістичної змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
Пластичності	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 приналежності, наприклад, яка обрана з вбудованої бібліотеки функцій належності пакету “Fuzzy logic Toolbox” комплексу MATLAB. Для даної задачі вибрано дзвоноподібну функцію належності, яка описується рівнянням

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

де b – координата максимуму;
 c – коефіцієнт концентрації.

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

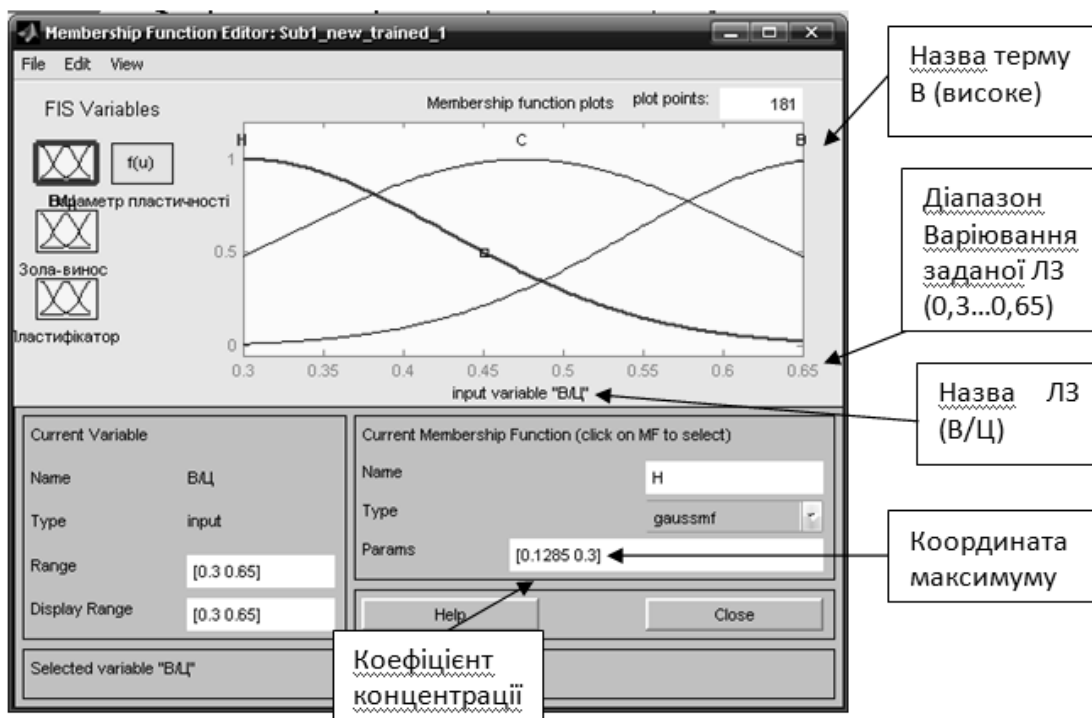


Рис. 2. Інтерфейс встановлення функцій належності

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 <антецедент правила>, ТО <консеквент правила> [15].

Антецедент 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 є 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:

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

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

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 $D = d_j, j = \overline{1, m}$;

$w_{jp} \in [0, 1]$ – 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:

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

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				
Якщо				То
Вік бетону, (x ₉)	Коефіцієнт ущільнення, (x ₁₀)	Укрупнений параметр (y ₁)	Укрупнений параметр (y ₂)	Y
Н	Н	Н	Н	Н
Н	нС	Н	С	
С	нС	С	Н	
Н	Н	В	Н	
Н	нС	С	В	
В	С	С	С	
С	С	В	С	С
В	С	В	Н	
В	вС	С	В	В
В	вС	В	В	
В	В	Н	В	
С	В	В	В	

Таблиця 4

База знань для лінгвістичної змінної у ₁			
Параметр пластичності у ₁			
Якщо			То
В/Ц, (x ₁)	Зола-винос, (x ₂)	Витрата суперпластифікатора, % від маси цементу (x ₃)	у ₁
Н	Н	Н	Н
Н	С	Н	
С	Н	Н	
С	С	Н	
В	С	Н	С
С	В	Н	
Н	Н	В	В
С	Н	С	
Н	В	В	
Н	В	С	

База знань для лінгвістичної змінної y_2

Параметр пропорційності складу бетонної суміші y_2					
Якщо					То
Цемент(x_4)	Доменний шлак(x_5)	Вода(x_6)	Щебінь(x_7)	Пісок(x_8)	y_2
Н	Н	В	С	В	Н
Н	С	В	Н	С	
Н	Н	С	Н	В	
С	С	С	В	С	С
С	В	С	С	С	
С	С	Н	В	С	
С	С	Н	В	С	
С	В	В	В	С	В
В	В	С	В	В	
С	В	С	С	В	
В	С	С	В	С	
В	В	Н	В	С	

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

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

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

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

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

$$\mu_H(y_1) = \mu_H(x_1) \cdot \mu_H(x_2) \cdot \mu_H(x_3) \vee \mu_H(x_1) \cdot \mu_C(x_2) \cdot \mu_H(x_3) \vee \mu_C(x_1) \cdot \mu_H(x_2) \cdot \mu_H(x_3); \quad (10)$$

$$\mu_C(y_1) = \mu_C(x_1) \cdot \mu_C(x_2) \cdot \mu_H(x_3) \vee \mu_B(x_1) \cdot \mu_C(x_2) \cdot \mu_H(x_3) \vee \mu_C(x_1) \cdot \mu_B(x_2) \cdot \mu_H(x_3); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y_1) = & \mu_H(x_1) \cdot \mu_H(x_2) \cdot \mu_B(x_3) \vee \mu_C(x_1) \cdot \mu_H(x_2) \cdot \mu_C(x_3) \vee \\ & \vee \mu_H(x_1) \cdot \mu_B(x_2) \cdot \mu_B(x_3) \vee \mu_H(x_1) \cdot \mu_B(x_2) \cdot \mu_C(x_3). \end{aligned} \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned} \mu_H(y_2) = & \mu_H(x_4) \cdot \mu_H(x_5) \cdot \mu_B(x_6) \cdot \mu_C(x_7) \cdot \mu_B(x_8) \vee \mu_H(x_4) \cdot \mu_C(x_5) \cdot \mu_B(x_6) \cdot \mu_H(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \\ & \vee \mu_H(x_4) \cdot \mu_H(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_H(x_7) \cdot \mu_B(x_8); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(y_2) = & \mu_C(x_4) \cdot \mu_C(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \mu_C(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_C(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \\ & \vee \mu_C(x_4) \cdot \mu_C(x_5) \cdot \mu_H(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y_2) = & \mu_C(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_B(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \mu_B(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_B(x_8) \vee \\ & \vee \mu_C(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_C(x_7) \cdot \mu_B(x_8) \vee \mu_B(x_4) \cdot \mu_C(x_5) \cdot \mu_C(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8) \vee \\ & \vee \mu_B(x_4) \cdot \mu_B(x_5) \cdot \mu_H(x_6) \cdot \mu_B(x_7) \cdot \mu_C(x_8). \end{aligned} \quad (15)$$

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

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

$$\mu_H(y_2) = 0,664 \cdot 0,511 \cdot 0,232 \cdot 0,497 \cdot 0,372 \vee 0,664 \cdot 0,643 \cdot 0,232 \cdot 0,135 \cdot 0,995 \vee \vee 0,664 \cdot 0,511 \cdot 0,623 \cdot 0,135 \cdot 0,372 = 0,664; \quad (16)$$

$$\mu_C(y_2) = 0,785 \cdot 0,643 \cdot 0,623 \cdot 0,609 \cdot 0,995 \vee 0,785 \cdot 0,106 \cdot 0,623 \cdot 0,497 \cdot 0,995 \vee \vee 0,785 \cdot 0,643 \cdot 0,969 \cdot 0,609 \cdot 0,995 = 0,995; \quad (17)$$

$$\mu_B(y_2) = 0,785 \cdot 0,106 \cdot 0,232 \cdot 0,609 \cdot 0,995 \vee 0,185 \cdot 0,106 \cdot 0,623 \cdot 0,609 \cdot 0,372 \vee \vee 0,785 \cdot 0,106 \cdot 0,623 \cdot 0,497 \cdot 0,372 \vee 0,185 \cdot 0,643 \cdot 0,623 \cdot 0,609 \cdot 0,995 \vee \vee 0,185 \cdot 0,106 \cdot 0,969 \cdot 0,609 \cdot 0,995 = 0,623. \quad (18)$$

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

$$\mu_H(y_1) = 0,632 \cdot 0,945 \cdot 0,171 \vee 0,632 \cdot 0,426 \cdot 0,171 \vee 0,897 \cdot 0,945 \cdot 0,171 = 0,632; \quad (19)$$

$$\mu_C(y_1) = 0,897 \cdot 0,426 \cdot 0,171 \vee 0,998 \cdot 0,426 \cdot 0,171 \vee 0,897 \cdot 0,105 \cdot 0,171 = 0,897; \quad (20)$$

$$\mu_B(y_1) = 0,632 \cdot 0,945 \cdot 0,760 \vee 0,897 \cdot 0,945 \cdot 0,498 \vee \vee 0,632 \cdot 0,105 \cdot 0,760 \vee 0,632 \cdot 0,105 \cdot 0,498 = 0,632. \quad (21)$$

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

$$\mu_H(Y) = 0,038 \cdot 1,0 \cdot 0,632 \cdot 0,664 \vee 0,038 \cdot 1,0 \cdot 0,632 \cdot 0,995 \vee 0,566 \cdot 0,138 \cdot 0,897 \cdot 0,664 \vee \vee 0,038 \cdot 1,0 \cdot 0,632 \cdot 0,664 \vee 0,038 \cdot 0,138 \cdot 0,897 \cdot 0,623 = 0,897; \quad (22)$$

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

$$\mu_B(Y) = 1,0 \cdot 0,02 \cdot 0,897 \cdot 0,623 \vee 1,0 \cdot 0,02 \cdot 0,632 \cdot 0,623 \vee \vee 1,0 \cdot 0,012 \cdot 0,632 \cdot 0,623 \vee 0,566 \cdot 0,012 \cdot 0,632 \cdot 0,623 = 0,632. \quad (24)$$

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

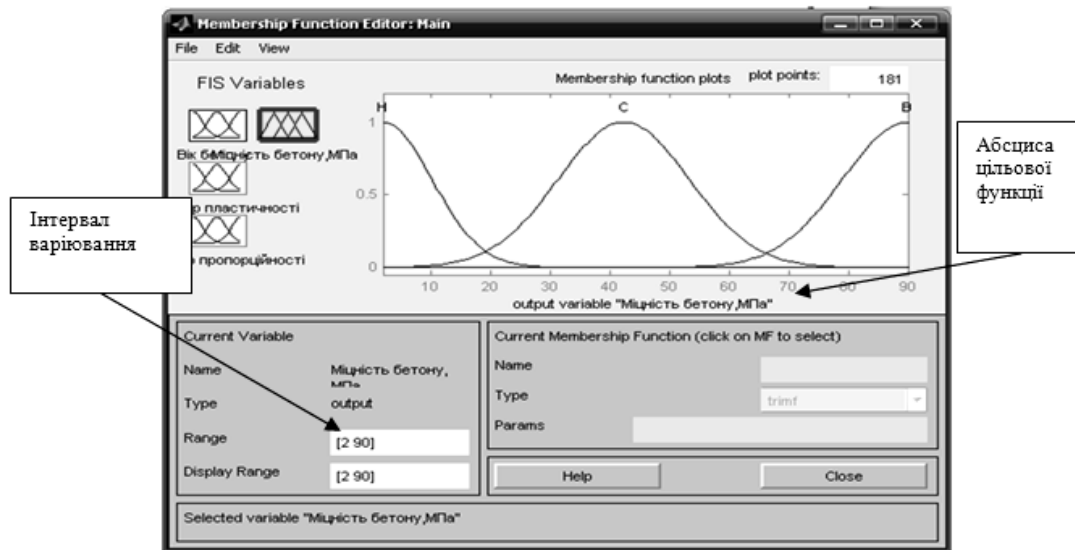


Рис. 3. Лінгвістична змінна “Міцність бетону” з інтервалом варіювання

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 аналізу 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. Міхєєв 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. Міхєєв. – 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 проектирования составов бетонных смесей и их корректировка на основе прогнозирования качества будущего бетона с использованием четких 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.nbu.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. Хмельниц. 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.