

Doświadczalne badania i modelowanie wytrzymałości BWW, wytwarzanego z dwuskładnikowych i trójskładnikowych spoiw

Experimental and modeling study of strength of high strength concrete containing binary and ternary binders

Keywords: fly ash, ground granulated blastfurnace slag, metakaolin, prediction, silica fume

1. Wprowadzenie

Popiół lotny (PI), pył krzemionkowy (Pk) i zmielony, granulowany żużel wielkopiecowy (Ż) są powszechnie stosowanymi dodatkami mineralnymi do produkcji betonu zwykłego (ZB) i o wysokiej wytrzymałości (BWW). Metakaolinit o dużej reaktywności (MKDR) jest stosunkowo nowym dodatkiem mineralnym, otrzymywanym w wyniku prażenia kaolinu o dużej czystości. Zastępowanie cementu przez MKDR zwiększa wytrzymałość szczególnie w późniejszym okresie twardnienia i poprawia trwałość betonu (1-3). Pumeks (P) jest porowatym szkłem wulkanicznym zawierającym 60-75% SiO₂ oraz 13-17% Al₂O₃. Po drobnym zmieleniu wykazuje właściwości pucolanowe, jednak jest głównie stosowany jako kruszywo lekkie w przemyśle betonów (4, 5). MKDR i P są białego koloru i z tego względu są przydatne do produkcji białego betonu, przy wspólnym stosowaniu z białym cementem portlandzkim (BCP) (1).

Zaletami w stosowaniu dodatków mineralnych są przede wszystkim lepsze właściwości świeżego i stwardniałego betonu jak również korzyści ekonomiczne i ekologiczne. Zalety te są ważniejsze w przypadku BWW, gdyż zawiera on większą ilość spoiwa w porównaniu z normalnym betonem.

W związku z tym, że te dodatki mają różne właściwości wpływają one także w różny sposób na właściwości betonu: początkowe reakcje Pk i Ż są wolniejsze niż cementu portlandzkiego (CP), co powoduje wolniejszy przyrost wytrzymałości i pociąga za sobą dłuższy okres dojrzewania. Natomiast przyrost wytrzymałości w przypadku żużla jest szybszy niż w przypadku większości popiołów lotnych (6). Pył krzemionkowy w związku z bardzo dużą powierzchnią właściwą zwiększa właściwą zawartość wody i superplastyfikatora (SP) dla osiągnięcia założonej konsystencji (7, 8). Ponadto stosowanie Pk jest ograniczone z uwagi na jego duży koszt oraz zwiększony dodatek SP. Wapienny popiół lotny (PI/W) ma większą reaktywność niż popiół o małej zawartości wapnia (PI/N) i z tego względu jest zbliżony do Ż (9, 10).

1. Introduction

Silica fume (SF), fly ash (FA) and ground granulated blastfurnace slag (S) are among the most widely utilized mineral additions for normal strength concrete (NSC) and high strength concrete (HSC). High Reactivity Metakaolin (HRMK) is a relatively new mineral addition, produced by calcination of highly pure kaolin. The replacement of cement with HRMK increases the strength, especially at early ages, and improves durability of concrete. (1-3). Pumice (P) is a porous volcanic glass containing 60-75 SiO₂% and 13-17% Al₂O₃. When finely ground, it shows pozzolanic characteristics but it is generally used as a lightweight aggregate in the concrete industry (4, 5). HRMK and P have white color and, therefore, are useful for production of white concrete when applied with white Portland cement (WPC) (1).

The advantages of using mineral additions consist mainly in the improved properties of fresh and hardened concrete, as well as economical and ecological benefits. The achievement of these advantages becomes more important for HSC, since it requires larger amounts of cementitious materials in comparison with normal concrete.

Since these additions have different properties they affect the concrete properties in different ways: Initial reactions of FA and S are slower than that of Portland cement (PC), which causes a slower rate of strength development and a longer curing period. Slags develop strength more rapidly than most fly ashes do (6). SF, due to its high surface area, increases water demand and superplasticizer (SP) requirement for a certain consistency (7, 8). In addition, the use of SF may require limitations due to the high costs of SF itself and the required SP. The high-calcium fly ash (FA/C) is much more reactive than the low-calcium fly ash (FA/F) and, therefore, exhibits some similarity to the behavior of S (9, 10).

The combined use of these additions as ternary binders (PC+ two types of mineral additions) may provide synergy and result in a bet-

Równoczesne stosowanie tych dodatków w układach trójskładnikowych (CP i dwa rodzaje dodatków mineralnych) mogą spowodować efekt synergiczny co pociągnie za sobą lepsze właściwości BWW niż dodatek tylko jednego dodatku mineralnego obok CP (układ dwuskładnikowy) (11, 12). Dobre spoiwo mieszane można otrzymać dobierając rodzaj i ilość dodatków mineralnych jak to wykazano w dalszej części artykułu.

Trzeba pamiętać, że dodatki mineralne o małej powierzchni właściwej i małej reaktywności nie mają wpływu na wczesną wytrzymałość betonu. Mehta i Gjorv (11) zaproponowali stosowanie normalnych i reaktywnych dodatków jak odpowiednio popiół lotny i pył krzemionkowy, tak aby Pk zwiększało wytrzymałość szczególnie w początkowym okresie, a PI miało wpływ po dłuższym okresie. W szeregu pracach wykazano, że równoczesne stosowanie PI i Pk powoduje poprawę wytrzymałości na ściskanie (8, 11, 12), rozkład wielkości porów (11), przepuszczalność chlorków (12, 13), reakcję kruszywa z alkaliom (13, 14) i odporność na siarczan (13). Równoczesny dodatek drobno zmielonego PI i Ż z cementem portlandzkim powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie po wszystkich okresach dojrzewania w porównaniu ze spoiwami dwuskładnikowymi (15). Podobnie według Li i Zhao (16) zmieszanie PI i Ż powoduje wzrost wytrzymałości tak po krótkim jak i po dłuższym czasie twardnienia oraz poprawę odporności na działanie H_2SO_4 , a także poprawia mikrostrukturę i tempo hydratacji. Jianyong i Pei (17) dochodzą do wniosku, że zmieszanie Ż i PI wywołuje efekt synergiczny polepszając wpływ tych dwu dodatków, w związku z czym wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu oraz wytrzymałość zmęczeniowa ulegają zwiększeniu, a mieszanka betonowa ma dobrą urabialność. Trójskładnikowe mieszaniny CP, PI i Pk lub Ż były także badane i okazało się, że te wieloskładnikowe spoiwa zwiększają odporność na reakcję alkaliów z kruszywem i odporność betonu na chlorki (18).

Niezależnie od lepszych właściwości spoiw trójskładnikowych w porównaniu z dwuskładnikowymi, w niektórych przypadkach równoczesne stosowanie dodatków mineralnych może dawać gorsze wyniki. Innymi słowy zgodność wpływu tych dodatków jest problemem, który trzeba uwzględnić w projektowaniu betonu. Na przykład reaktywność PI/N wymaga dużej zasadowości roztworu w porach betonu i zasadowość ta zmniejsza się gdy w mieszance są zawarte PI i Ż. Z tych względów reaktywność PI w takich mieszankach ulega zmniejszeniu (10, 19).

Zakładając złożoność wpływu pojedynczych i wieloskładnikowych dodatków, mały stosunek wody do spoiwa (w/s) i potrzebę dużej jego zawartości w BWW, skład tego ostatniego ma większe znaczenie niż w przypadku zwykłego betonu. Z tych powodów trzeba wykonać większą ilość zarobów próbnych w celu znalezienia najkorzystniejszego składu mieszanki, w porównaniu do zwykłego betonu (20). Jest to związane ze stratą czasu, robocizny i materiałów, przyczyniając się do zwiększenia kosztów betonu. Z tego względu trzeba zastosować inne podejście w celu przewidywania właściwości betonu przy zmniejszonej ilości zarobów próbnych.

ter performance of HSC than using only a single mineral additions with PC (binary binder) (11, 12). However, a good combination can be obtained by selecting the type and amount of the mineral additions properly as explained further.

Since the mineral additions with the low surface area and low reactivity do not contribute to the strength quickly, they are not able to improve early strengths of concrete. Mehta and Gjorv (11) proposed to use a mixture of normal and highly reactive additions, such as FA and SF, respectively, so that SF improves the strength especially at early ages while FA contributes in a longer time. A number of reports demonstrated that the combined usage of SF and FA results in improvements of compressive strength (8, 11, 12), pore size distribution (11), chloride permeability (12, 13), alkali-silica reactions (13, 14) and sulfate resistance (13). The combination of finely ground FA and S with PC was reported to produce higher compressive strengths at all ages than their binary blends (15). Similarly, according to Li and Zhao (16), blending FA and S presents an excellent behavior in both short- and long-term compressive strengths and in resistance to H_2SO_4 attack, and improves the microstructure and hydration rate. Jianyong and Pei (17) concluded that blending S and SF synergizes the advantages of these two additions so that the compressive strength, split tensile strength and rupture strength are improved while the fresh concrete mixture keeps good workability. The ternary blends of PC, SF and FA or S were also studied and it was found that these blends can increase the ASR resistance (14) and chloride resistance (18) of concrete.

Despite the superior performance of ternary binders over binary systems, in some cases the combined usage of mineral additions may reduce efficiency of the cementitious system. In other words, their compatibility is another point to be considered in the concrete design. For example, the reaction of FA/F requires high alkalinity of the pore solution and this alkalinity is reduced when SF or S is present in the mix. Consequently, reactivity of FA in such mixes is reduced (10, 19).

Given the complexity of the individual and combined effects of the additions, a low water-to-binder ratio (w/b) and high amounts of binder content required in HSC, the composition becomes more critical than in the case of normal strength concrete (NSC). Therefore, a greater number of trial batches are needed to determine optimum mixture proportions when compared to NSC (20). However, this causes loss of time, manpower, and materials, resulting in a higher cost of the concrete. Therefore, other methods are needed to predict the concrete properties with a reduced number of trial batches.

Recently, the artificial neural network (ANN) has been employed for predicting concrete strength (21-26). For example, Topçu and Sarıdemir (21) predicted the strength of concretes containing low-lime and high-lime FA with good accuracy applying ANN model. Öztaş et al. (23) were able to predict the HSC strength with a mean error lower than 2%. Guang and Zong (22) stated that the results obtained by ANN modeling conform to some rules of concrete mix

Ostatnio zaczęto stosować sieci neuronowe (SN) w celu przewidywania wytrzymałości betonu (21-26). Na przykład Topçu i Saridemir (21) przewidywali wytrzymałość z dobrą dokładnością betonu zawierającego wapienne i krzemionkowe popioły lotne przy zastosowaniu sieci neuronowych. Öztaş i in. (23) przewidzieli wytrzymałość BWW z błędem mniejszym od 2%. Guang i Zong (22) stwierdzili, że wyniki otrzymane w oparciu o model SN odpowiadają dobrze zasadom projektowania składu mieszanki betonowej i są w zgodności z danymi doświadczalnymi. Yeh (24) badał modelowanie wytrzymałości BWW i doszedł do wniosku, że modele oparte na SN są dokładniejsze od analizy regresji, w przypadku gdy danymi wejściowymi modelu SN były zawartości cementu, PI, Ż, wody, SP, grubego i drobnego kruszywa i czas twardnienia, a tymi danymi w przypadku analizy regresji były czas twardnienia i stosunek w/s. Lepsze wyniki uzyskiwane za pomocą SN niż analizy regresji stwierdzili także Dias i Pooliyadda (25) w przypadku betonu bez dodatków.

W tej pracy badano wytrzymałość na ściszenie BWW wytwarzanego w laboratorium. Mieszanki zawierały:

- a) jedno spoiwo (tylko CP lub biały cement portlandzki [BCP]),
- b) dwuskładnikowe spoiwo (CP + PI lub BCP + MKDR),
- c) trójskładnikowe spoiwo (CP + Pk + PI/N, CP + Pk + PI/w i CP + PI + Ż lub BCP + MKDR + P). Sporządzono ogółem 130 mieszanek z różną zawartością spoiwa i różną ilością dodatków mineralnych. Oznaczono wytrzymałość betonu doświadczalnie, a równocześnie zastosowano trzy metody do przewidywania niektórych z badanych wytrzymałości, a mianowicie sieci neuronowe (SN), liniową analizę regresji (LAR) i nieliniową analizę regresji (NLAR). Dane wejściowe wykorzystane w tych modelach były następujące: zawartość spoiwa i udział w nim dodatków oraz czas dojrzewania, podczas gdy danymi wyjściowymi była tylko wytrzymałość na ściszenie. Dokładność modeli oceniono na zasadzie analizy błędów.

Autorzy nie natrafili na prace przeznaczone do przewidywania wytrzymałości BWW sporządzonych ze spoiw dwuskładnikowych: CP + PI lub BCP + MKDR i trójskładnikowych spoiw CP + Pk + PI/N, CP + Pk + PI/w, CP + Pk + Ż lub BCP + MKDR + P. Autorzy nie spotkali także w literaturze doświadczalnych badań BWW zawierających spoiwa dwuskładnikowe: BCP + MKDR i trójskładnikowe BCP + MKDR + P. Uzupełniając ten brak te doświadczenia stanowiąc będą ważny wkład do badań BWW. Ponadto zbadane modele pozwolą na zmniejszenie liczby zarobów doświadczalnych i ich kosztów; oszczędzając czas, siłę roboczą i materiały.

2. Program doświadczeń

Doświadczenia obejmowały przygotowanie dwóch serii BWW. W serii pierwszej do wykonania próbek betonu zastosowano CP oraz spoiwa, które obok CP zawierały Pk, PI/k, PI/w oraz Ż. W drugiej serii próbki białego betonu otrzymano z BCP, MKWR i P. Każda seria obejmowała próbki betonów wykonane ze spoiw dwuskładnikowych i trójskładnikowych.

proportioning and are in good agreement with the experimental data. Yeh (24) studied strength modeling of high-performance concrete and concluded that ANN models have higher accuracy than regression analyses where the ANN input parameters were cement, FA, S, water, SP, coarse and fine aggregate contents and age, and the regression inputs were test age and water-to-binder ratio. The better performance of ANN than regression models was noted also by Dias and Pooliyadda (25) for the concretes with admixtures.

In this study, compressive strength of HSC produced in the laboratory was examined. The mixtures contained (a) a single binder (PC or WPC only), (b) a binary binder (PC+SF or WPC+HRMK), or (c) a ternary binder (PC+SF+FA/F, PC+SF+FA/C and PC+SF+S or WPC+HRMK+P). A total of 130 mixtures were prepared with the different total binder content and the different quantity of mineral additions. The strength was determined experimentally, and simultaneously 3 methods were used to predict some of the measured strengths artificial neural network (ANN), multiple linear regression (MLR) and nonlinear multiple regression (NLMR). The input parameters used in these models were binder content, mineral addition percentage, and curing time, whereas the only output was the compressive strength. Accuracy of the models was evaluated with error analyses.

The authors did not find any papers devoted to the prediction of HSC strength made of binary PC+SF or WPC+HRMK and ternary PC+SF+FA/F, PC+SF+FA/C, PC+SF+S or WPC+HRMK+P binders. Also, the authors could not read any experimental studies of the strength of HSC mixtures containing binary: WPC+HRMK and ternary: WPC+HRMK+P binders, in the technical literature. Filling these gaps in this study, it would be an important contribution to the works on HSC. Moreover, the prediction methods can reduce the number of trial batches and cost by savings in time, manpower, and materials.

2. Experimental program

Two series of HSC were produced. In the first one, the concrete was prepared using PC without and with the addition of SF, FA/F, FA/C and S. In the second, white concrete was produced of WPC, HRMK and P. Each series embraced two kinds of concrete made of binary and ternary binders.

2.1. Materials

Material properties and all other details of the experiments for concrete of Series I concretes can be found in our previous study (27). The properties of the WPC, HRMK and P used in series II are given in Table 1. Pumice, obtained from Nevsehir, Turkey, was ground in a laboratory mill. The 28-day strength activity indices of HRMK and P, as determined according to ASTM C 311, were 122 and 77%, respectively.

Tablica 1 / Table 1

PROPERTIES OF BINDERS USED IN CONCRETE OF SERIES II

	WPC	HRMK	P
SiO ₂ , %	21.48	55.3	72.87
Al ₂ O ₃ , %	4.17	41.5	12.75
Fe ₂ O ₃ , %	0.18	0.7	1.11
CaO, %	65.16	0.0	0.83
MgO, %	1.33	0.28	0.11
Na ₂ O, %	0.21	0.11	4.07
K ₂ O, %	0.48	2.10	4.59
SO ₃ , %	3.85	0.0	0.0
Loi, %	3.09	0.84	5.47
CIE Whiteness, %	85.5	85.1	71.6
Specific gravity	3.05	2.60	2.30
Mean diameter, mm	12.5	2.80	21.81

2.1. Materiały

Właściwości materiałów i inne informacje na temat doświadczeń odnoszące się do serii I są podane w naszej wcześniejszej pracy (27). Właściwości BPC, MKWR i P, stosowanych w serii II, są podane w tablicy 1. Pumeks pochodzący z Nevsehir w Turcji, zmielono w młynku laboratoryjnym. Współczynniki aktywności MKWR i P, oznaczone zgodnie z ASTM C311, wynosiły odpowiednio 122% i 77%.

2.2. Seria I: próbki betonu otrzymane z CP

Program doświadczalny serii I składał się z dwóch etapów. W pierwszym przygotowano 20 mieszanek (tablica 2). Mieszanki przygotowano wyłącznie z CP lub ze spoiwa dwuskładnikowego, złożonego z CP i Pk. Ilość spoiwa wynosiła 500, 550, 600, 650 i 700 kg/m³. W spoiwie dwuskładnikowym zastępowano CP przez Pk w ilości 5%, 10% i 15% masowych. Te próbki betonu z CP + Pk osiągnęły największą wytrzymałość, w których Pk zastępowała 15% mas. CP, a 10% tylko w tym przypadku gdy ilość spoiwa wynosiła 650 kg/m³.

W drugim etapie przygotowano trzy różne rodzaje betonu, co pokazano w tablicy 3: (a) BWW zawierający CP + Pk + PI/k, (b) BWW zawierający CP + Pk + PI/w, (c) BWW zawierający CP + Pk + Ż. W tych trójskładnikowych spoiwach zawartość Pk utrzymywano na poziomie, który okazał się najlepszy w pierwszej fazie. PI/k, PI/w lub Ż zastępowały cement na czterech różnych poziomach: 10, 20, 30 i 40% mas. Tak więc w drugiej fazie przygotowano 3 rodzaje spoiwa, 4 poziomy zastępowania cementu i 5 zawartości spoiwa co w sumie dało 60 mieszanek betonowych.

2.3. Seria II; próbki betonu z BCP

W drugiej serii próbki betonu przygotowywano także w dwóch fazach. Pierwsza obejmowała 30 mieszanek zawierających 5 poziomów spoiwa: 500, 550, 600, 650 i 700 kg/m³, jak to pokazano w tablicy 4. Spoiwo składało się tylko z BCP lub obejmowało

Tablica 2 / Table 2.

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE OF PC + SF BINDER

Binder content kg/m ³	SF %	Compressive strength, MPa		
		3-d	7-d	28-d
500	0	40.4 ^a	50.0 ^a	55.1
	5	44.9	51.0	59.6
	10	54.3 ^a	60.3 ^a	69.2 ^a
	15	51.5 ^a	62.4 ^a	72.0 ^a
550	0	47.4 ^a	49.7 ^a	56.3 ^a
	5	49.3 ^a	49.8 ^a	62.9 ^a
	10	51.5	55.1	62.5
	15	55.3 ^a	62.3 ^a	67.6 ^a
600	0	48.3	49.9	56.0
	5	52.2	56.1 ^a	60.1 ^a
	10	58.4 ^a	63.3 ^a	74.7 ^a
	15	56.4 ^a	61.2 ^a	70.7
650	0	56.1 ^a	58.0 ^a	65.1 ^a
	5	51.4 ^a	57.6	63.4 ^a
	10	59.5 ^a	63.5 ^a	65.9 ^a
	15	58.9	59.7	68.7
700	0	51.9	50.3 ^a	54.2 ^a
	5	61.1 ^a	65.2 ^a	73.6 ^a
	10	58.0 ^a	62.4 ^a	72.6
	15	62.1	72.6	80.5 ^a

^a Training and calibration model data for ANN. Other data were used for testing and validation for regression analyses

2.2. Series I: concretes of PC

The experimental program for Series I consisted of two stages. In the first one, a total of 20 mixtures were prepared (Table 2). The mixtures contained a single (PC only) or a binary binder (PC + SF). The total amount of the binder was 500, 550, 600, 650 or 700 kg/m³. In the binary binder 5%, 10% and 15% by mass of PC was replaced by SF. The concrete of PC + SF has the highest strength for 15% of PC replacement and only for 10% in the case of 650 kg/m³ of binder.

In the second phase, three different types of concrete were prepared as shown in Table 3: (a) HSC containing PC + SF + FA/F, (b) HSC containing PC + SF + FA/C, (c) HSC containing PC + SF + S. These ternary binders had the SF content found to be the best in the first phase. PC was replaced by FA/F, FA/C or S at 4 different levels: 10, 20, 30 and 40% by mass. Therefore, 3 - binder types, 4 - replacement levels, and - 5 binder dosages have given 60 concrete mixtures produced in the second phase.

2.3. Series II: concrete samples of WPC

In Series II the samples of concrete were also produced in two stages. In the first phase, 30 mixtures were prepared containing 5 binder dosages (500, 550, 600, 650 and 700 kg/m³) as it is depicted

Tablica 3 / Table 3

COMPRESSIVE STRENGTH OF SERIES I CONCRETE FROM TERNARY BINDERS

Binder content kg/m ³	SF %	FA/F, FA/C or S %	Compressive strength, MPa								
			PC + SF + FA/F			PC + SF + FA/C			PC + SF + S		
			3-d	7-d	28-d	3-d	7-d	28-d	3-d	7-d	28-d
500	15	0	51.5 ^a	62.4 ^a	72.0 ^a	51.5	62.4 ^b	72.0	51.5	62.4 ^c	72.0 ^c
	15	10	52.4	62.7	70.9 ^a	55.2 ^b	61.6	79.8	60.2 ^c	64.4	71.4 ^c
	15	20	54.8 ^a	68.4 ^a	82.2 ^a	56.2 ^b	67.6	71.4 ^b	57.6	74.2 ^c	88.7 ^c
	15	30	41.4	59.7 ^a	79.7	52.5 ^b	58.4 ^b	77.9 ^b	55.0 ^c	64.2 ^c	78.4 ^c
	15	40	34.8 ^a	53.6 ^a	71.3	51.4 ^b	70.5 ^b	90.7 ^b	49.9 ^c	66.4	72.0
550	15	0	55.3 ^a	62.3 ^a	67.6 ^a	55.3 ^b	62.3	67.6 ^b	55.3 ^c	62.3 ^c	67.6 ^c
	15	10	53.8	62.9	72.2 ^a	53.1	62.3 ^b	77.0 ^b	59.1 ^c	69.4 ^c	89.7 ^c
	15	20	51.3	66.2 ^a	84.7 ^a	65.2 ^b	79.3 ^b	95.3 ^b	54.4 ^c	65.4 ^c	70.0 ^c
	15	30	47.3 ^a	59.2 ^a	72.2	56.0	62.2 ^b	85.3	54.4	65.3	68.2
	15	40	38.4 ^a	51.8 ^a	71.2 ^a	51.3 ^b	63.9 ^b	90.8	51.3 ^c	64.0	65.7
600	10	0	58.4 ^a	63.3	74.7 ^a	58.4	63.3 ^b	74.7 ^b	58.4	63.3 ^c	74.7 ^c
	10	10	56.0 ^a	65.0 ^a	75.0	63.7 ^b	70.1	91.5 ^b	54.0 ^c	63.5	67.4 ^c
	10	20	56.7	66.9 ^a	76.8 ^a	65.4 ^b	66.8 ^b	92.5	55.6	65.4	71.7 ^c
	10	30	46.6 ^a	61.5 ^a	77.1	63.5	76.3 ^b	93.9 ^b	55.7 ^c	65.4 ^c	78.0
	10	40	54.9 ^a	66.7	87.0 ^a	58.0 ^b	63.6	85.1 ^b	60.1 ^c	73.5 ^c	91.9 ^c
650	15	0	58.9	59.7	68.7 ^a	58.9	59.7 ^b	68.7 ^b	58.9	59.7 ^c	68.7 ^c
	15	10	62.8 ^a	70.3 ^a	93.7 ^a	60.6 ^b	68.2 ^b	79.5	60.9 ^c	65.9	71.8
	15	20	59.4 ^a	69.5	90.3	68.3 ^b	78.1	99.1	64.5 ^c	64.7 ^c	77.1 ^c
	15	30	50.5	65.2 ^a	85.2 ^a	68.7 ^b	81.0 ^b	100.7 ^b	56.9 ^c	65.0 ^c	82.3
	15	40	45.3 ^a	58.0 ^a	72.3	54.3 ^b	66.5	89.7 ^b	61.6	77.4 ^c	93.3 ^c
700	15	0	62.1	72.6 ^a	80.5 ^a	62.1 ^b	72.6	80.5 ^b	62.1 ^c	72.6	80.5 ^c
	15	10	64.5 ^a	70.6	89.8 ^a	63.5 ^b	71.5 ^b	77.8 ^b	60.4	67.8	74.9 ^c
	15	20	55.3 ^a	68.0 ^a	83.1	72.3 ^b	82.3 ^b	103.3	68.6 ^c	72.5 ^c	84.4
	15	30	49.8	67.6	82.6 ^a	67.2	81.7	107.0 ^b	58.1 ^c	66.6 ^c	79.1 ^c
	15	40	38.4 ^a	56.3 ^a	66.0 ^a	62.6	75.3 ^b	74.5 ^b	60.9	76.8 ^c	95.8 ^c

^a Training and calibration model data for ANN in the case of ternary binders. Other data were used for testing and validation for series I concrete

^b As above, but for another ternary binder. Other data for the same binder for testing and validation

^c Training and calibration model data for ANN in the case of binder PC + SF + S. Other data for the same binder are for testing and validation

dwa składniki (BCP + MKWR). W tym ostatnim BCP był zastępowany przez MKWR na poziomie 5%, 10%, 15%, 20% i 25% mas.

W drugiej fazie próbki BWW przygotowywano ze spoiw trójskładnikowych zawierających BCP, MKWR i P (tablica 5). Podobnie jak w pierwszej serii wyniki w niej uzyskane wykorzystano do ustalenia poziom zastępowania CP przez MKWR w spoiwach trójskładnikowych. Wynosił on 10% w przypadku 500 i 650 kg/m³, a 15% w przypadku 550 i 600 kg/m³ oraz 5% przy 700 kg/m³. Jeszcze raz dodatek MKWR został wybrany w oparciu o największą wytrzymałość próbek betonu otrzymanych w pierwszej fazie. Analogicznie jak w serii I w spoiwach trójskładnikowych BCP zastępowano przez P na czterech poziomach: 10, 20, 30 i 40% masowych ogólnej ilości spoiwa.

W obu seriach wytrzymałość oznaczano na trzech kostkach o wymiarach 15 cm po 3, 7 i 28 dniach dojrzewania. Inne dane, a mianowicie kruszywo, konsystencja, wypełnianie form, dojrzewanie

in Table 4. The binders were composed of WPC only or of two components (WPC + HRMK). In the last one, WPC was replaced by HRMK at the level of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% by mass.

In the second phase, HSC samples were prepared from three components binders containing WPC, HRMK and P (Table 5). Similarly to the first series, the results of the first phase were used to determine the HRMK replacement level in ternary blends. They were 10% for 500 and 650 kg/m³, 15% for 550 and 600 kg/m³, and 5% for 700 kg/m³. Again, the HRMK amounts were selected based on the highest strengths of concrete samples produced in the first phase. Like the Series I, in the ternary binders, WPC was replaced by P at 4 different levels: 10, 20, 30 and 40% by mass of the total binder content.

In both series, three 15-cm cubes were used for strength measurements after 3, 7 and 28 days of curing. Other details, such as, aggregates, consistency, placing, curing etc, were same for Series I and II concretes, and can be found in (27).

Tablica 4 / Table 4

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE FROM WPC + HRMK BINARY BLENDS

Binder content kg/m ³	HRMK %	Compressive strength, MPa		
		3-d	7-d	28-d
500	0	57.9 ^a	62.5 ^a	67.7 ^a
	5	57.6 ^a	65.1	70.4
	10	56.5	65.6 ^a	71.7 ^a
	15	52.8 ^a	58.4 ^a	62.3 ^a
	20	51.3	55.5 ^a	61.4 ^a
	25	51.5 ^a	55.5	62.6
550	0	57.8	64.3 ^a	67.2
	5	59.0 ^a	65.4	67.5 ^a
	10	59.5 ^a	66.0 ^a	70.4 ^a
	15	62.3 ^a	70.9 ^a	72.8
	20	60.1	67.9	70.7 ^a
	25	54.7 ^a	64.3 ^a	66.8 ^a
600	0	59.8 ^a	61.0 ^a	65.6 ^a
	5	59.3 ^a	62.6 ^a	67.5
	10	58.3	66.2	71.1 ^a
	15	59.4 ^a	69.6 ^a	72.7 ^a
	20	53.3 ^a	58.1	62.3
	25	50.8	54.3 ^a	55.8 ^a
650	0	52.9 ^a	54.9 ^a	62.7
	5	53.9	56.4	64.4 ^a
	10	61.2 ^a	65.5 ^a	71.2 ^a
	15	54.8 ^a	55.8	65.1
	20	51.0 ^a	52.8 ^a	55.5 ^a
	25	55.9	65.0 ^a	70.9 ^a
700	0	52.3 ^a	54.9	62.7
	5	65.3 ^a	67.6 ^a	74.2 ^a
	10	61.1	67.7	74.0 ^a
	15	61.0 ^a	67.8 ^a	73.5
	20	60.0	67.5 ^a	73.2 ^a
	25	48.4 ^a	50.5 ^a	54.3 ^a

^a Training and calibration model data for ANN. Others are testing and validation data

i inne warunki były takie same w przypadku próbek betonów serii I i II i są opisane we wcześniejszej pracy (27).

3. Zbiór danych i sporządzanie modeli

Wyniki badania wytrzymałości próbek betonu otrzymanych w serii I, przy zastosowaniu dwu i trójskładnikowych spoiw podano odpowiednio w tablicach 2 i 3, w których znaleźć można także wyniki wykorzystane dla sporządzenia i sprawdzenia SSN oraz dla kalibracji i sprawdzenia analiz regresji. Należy podkreślić, że wybór danych przeprowadzono losowo, w celu uniknięcia błędu systematycznego. Jak to wynika z tablicy 2 wykorzystano zbiór 40 wyników dla kalibracji i 20 dla sprawdzenia modeli w przypadku próbek betonu z dwuskładnikowych spoiw, otrzymanych w serii I. Z danych

Tablica 5 / Table 5

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE FROM WPC + HRMK + P TERNARY BLENDS

Binder Content kg/m ³	HRMK %	P %	Compressive Strength, MPa		
			3-d	7-d	28-d
500	10	0	56.5 ^a	65.6	71.7 ^a
		10	54.7	63.3 ^a	70.5
		20	46.2 ^a	56.3 ^a	60.8 ^a
		30	39.4 ^a	55.7	62.6
		40	32.2	45.5 ^a	59.1 ^a
		50	25.5 ^a	35.5 ^a	45.5 ^a
550	15	0	62.3 ^a	70.9 ^a	72.8 ^a
		10	49.9	55.7 ^a	70.8
		20	47.5 ^a	54.1 ^a	68.7 ^a
		30	42.5	53.9 ^a	67.9
		40	32.3 ^a	48.4	60.1 ^a
		50	25.5 ^a	35.5 ^a	45.5 ^a
600	15	0	59.4 ^a	69.6 ^a	72.7 ^a
		10	50.6 ^a	66.0	74.3 ^a
		20	50.8 ^a	65.5 ^a	72.7 ^a
		30	41.9	60.0	68.1 ^a
		40	34.1 ^a	51.4 ^a	60.4
		50	25.5 ^a	35.5 ^a	45.5 ^a
650	10	0	61.2 ^a	65.5	71.2 ^a
		10	60.6	66.2 ^a	72.4
		20	56.0	66.4 ^a	71.9 ^a
		30	47.2 ^a	53.2 ^a	57.3 ^a
		40	40.2 ^a	50.0 ^a	55.4
		50	25.5 ^a	35.5 ^a	45.5 ^a
700	5	0	65.3	67.6 ^a	74.2
		10	62.2 ^a	67.5	74.5 ^a
		20	56.4 ^a	66.9 ^a	72.6 ^a
		30	47.5 ^a	53.4 ^a	59.5
		40	40.2 ^a	53.8	60.1 ^a
		50	25.5 ^a	35.5 ^a	45.5 ^a

^a Training and calibration model data for ANN. Others are testing and validation data

3. Data sets and model construction

The strength results of the concrete samples produced in Series I with binary and ternary binders are given in Tables 2 and 3, respectively, where the training and testing data for ANN and the model calibration and validation data for regression analyses are also depicted. It should be noted that identification of the data was made at random in order not to have a bias. As seen from Table 2, there are 40 training (calibration) data sets, and 20 testing (validation) data sets for concrete samples of two binders components produced in Series I. Table 3 shows that for each ternary binder, the number of training (calibration) data sets is 50, and the number of testing (validation) data sets is 25. In the case of Series II concretes, there are 60 training data sets and 30 testing data sets for the binary system (Table 4), and 50 training data sets and 25 testing data sets for the binary binder (Table 5).

zebranych w tablicy 3 wynika, że dla każdego układu, w którym stosowano spoiwa trójskładnikowe zbiór danych wykorzystanych do kalibracji wynosi 50, a zbiór danych dla sprawdzenia modeli obejmuje 25 próbek. W przypadku próbek betonu uzyskanych w serii II ze spoiw dwuskładnikowych wykorzystano 60 danych dla kalibracji i zbiór 30 wyników dla sprawdzenia (tablica 4) oraz 50 dla kalibracji i 25 danych dla sprawdzenia modeli w przypadku spoiw dwuskładnikowych (tablica 5).

3.1. Sztuczna sieć neuronowa (SSN)

Sztuczna sieć neuronowa (SSN) posiada zdolność do identyfikacji związku między zmiennymi wejścia i wyjścia. Na ogół stosuje się trójwarstwową jednokierunkową sieć neuronową (TSN) pokazaną na rysunku 1. W TSN wielkości wejściowe (x_i) są wprowadzone do neuronów warstwy wejściowej, które z kolei transmitują je do ukrytej warstwy neuronów po pomnożeniu ich przez związane wagi (v_{ij}) (Fig. 1):

$$net_j = \sum x_i v_{ij} - b_j$$

[1]

Neuron warstwy ukrytej dodaje wielkość wejściową przemnożoną przez wagę otrzymana z każdego neuronu wejścia ($x_i v_{ij}$), łącząc ją z odchyleniem (b_j), i wówczas przekazuje wynik (net_j) poprzez sigmoidalną funkcję aktywacji neuronu:

$$f(net_j) = \frac{1}{1 + e^{-net_j}} \quad [2]$$

Podobnie, otrzymane wyniki z wewnętrznych neuronów są przekazywane do neuronu sieci wyjścia. Bezpośrednia informacja wynikowa otrzymana przez neuron wyjściowy z neuronów wewnętrznych jest przekazywana przez funkcję sigmoidalną do wytworzenia produktu wyjściowego. Wagi optymalne poszukuje się przez minimalizowanie zadanej początkowo funkcji błędu (E) następującej postaci (28):

$$E = \sum_P \sum_p (y_i - t_i)^2 \quad [3]$$

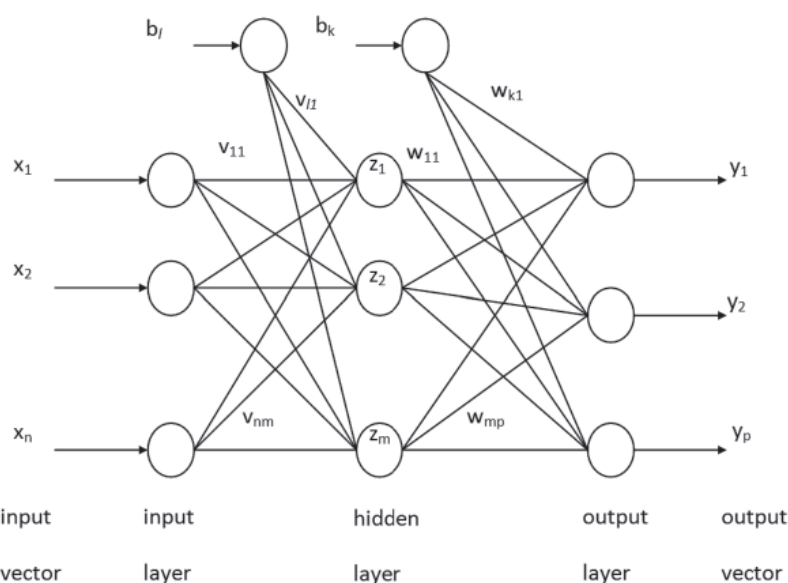
gdzie y_i – składowa wektora wyjścia \mathbf{Y} sieci SSN; t_i – składowik wektora celu wyjścia \mathbf{T} ; p – liczba neuronów wyjścia, i P – liczba wzorów trenujących.

Metoda najszybszego spadku gradientu, z regułą różniczkowania funkcji złożonej jest na ogół stosowana do modyfikacji wag sieci w postaci (28):

$$\Delta v_{ij}(n) = -\delta \frac{\partial E}{\partial v_{ij}} + \alpha \Delta v_{ij}(n-1) \quad [4]$$

gdzie $\Delta v_{ij}(n)$ i $\Delta v_{ij}(n-1)$ – przyrosty wag między węzłem i i j podczas n – tego i $n-1$ przejścia lub epoki; δ – szybkość uczenia się; i α – czynnik pędu.

W niniejszych badaniach Zawartość spoiwa (kg/m^3), PK %, $popiołu$ lotnego %, \dot{Z} %, i $wiek$ (dni) tworzą zmienne wejściowe (x_i) dla



Ryc. 1. Schemat trójwarstwowej, jednokierunkowej TSN

Fig. 1. Diagram of three-layer feed-forward ANN

3.1. Artificial Neural Network (ANN)

ANNs have the ability to identify patterns between input and output variables. The commonly employed three-layer feed-forward neural network (FFNN) is shown in Fig. 1. In a FFNN, the input quantities (x_i) are fed into the input layer neurons which, in turn, pass them on to the hidden layer neurons (z_i) after multiplying them by the connection weights (v_{ij}) (Fig. 1):

$$net_j = \sum x_i v_{ij} - b_j \quad [1]$$

A hidden layer neuron adds up the weighed input received from each input neuron ($x_i v_{ij}$), associates it with a bias (b_j), and then passes the result (net_j) on through the sigmoid transfer function:

$$f(net_j) = \frac{1}{1 + e^{-net_j}} \quad [2]$$

Similarly, the produced outputs from the inner neurons are passed to the network output neuron. The net information received by the output neuron from the inner neurons is passed through the sigmoid function to produce the network output. The optimal weights are found by minimizing a predetermined error function (E) of the following form (28):

$$E = \sum_P \sum_p (y_i - t_i)^2 \quad [3]$$

where y_i – the component of an ANN output vector \mathbf{Y} ; t_i – the component of a target output vector \mathbf{T} ; p – the number of output neurons; and P = the number of training patterns.

The gradient-descent method, along with the chain rule of differentiation, is generally employed to modify the network weights as [28]:

$$\Delta v_{ij}(n) = -\delta \frac{\partial E}{\partial v_{ij}} + \alpha \Delta v_{ij}(n-1) \quad [4]$$

Serii I betonów, podczas gdy napężenie było zmienną wyjściową (y_i) w zbudowanej trójwarstwowej TSN. W przypadku drugiej serii betonów zmienne wejściowe były zawartością dodatków wiążących, MKDR %, P % i wiek. Funkcja sigmoidalna była zastosowana jako funkcja aktywacyjna. Równania 3 i 4 są użyte w obliczeniach błędów całkowitego i uaktualniania wag sieciowych, odpowiednio. $\delta = 0.01$ było szybkością uczenia się, a $\alpha = 0.04$ było czynnikiem pędu. Liczba neuronów warstw wewnętrznych była znaleziona przy zastosowaniu metody prób i błędów. Równanie [5] było zastosowane do przeskalowania danych do przedziału 0,1 do 0,9.

$$x_i = 0.1 + \frac{0.8(x_i - x_{min_i})}{(x_{max_i} - x_{min_i})} \quad [5]$$

gdzie x_{max_i} i x_{min_i} są minimalnymi i maksymalnymi wartościami i -tego neuronu w warstwie wejścia odpowiednio dla wszystkich wektorów danych wejściowych.

3.2. Wielokrotna analiza regresji

W analizie regresji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. W celu otrzymania początkowego oszacowania zmiennych podstawowych w każdym jednowymiarowym wyszukiwaniu zastosowano liniową ekstrapolację w oparciu o wektor styczny. Następnie zastosowano ilorazy różnicowe wprzód w celu aproksymacji pochodnych cząstkowych funkcji celu i funkcji ograniczeń. W każdej iteracji stosowano metodę quasi-newtonowską w celu wybrania kierunku minimalizacji wartości funkcji celu.

3.2.1. Wieloekrotna liniowa analiza regresji (WLR)

Modele WLR opracowane w tej pracy są następujące:

W przypadku spoiw dwuskładnikowych:

$$\text{Wytrzymałość} = a + b_1 \cdot (\text{zawartość spoiwa}) + b_2 \cdot (\text{Pk}) + b_3 \cdot (\text{czas}) \quad [6]$$

W przypadku spoiw trójskładnikowych:

$$\text{Wytrzymałość} = a + b_1 \cdot (\text{zawartość spoiwa}) + b_2 \cdot (\text{Pk}) + b_3 \cdot (\text{czas}) + b_4 \cdot (\text{Pl/k\%}) \quad [7]$$

gdzie: a , b_1 , b_2 , b_3 i b_4 – współczynniki, których wartości otrzymano wykorzystując odpowiednie dane kalibracyjne ze zbioru. Należy podkreślić, że w równaniach 6 i 7 Pk jest zastąpiony przez MKWR w przypadku próbek betonów otrzymanych w serii II oraz Pl/k w równaniu 7 jest zastąpiony przez Pl/w, Ż lub P w przypadku spoiw trójskładnikowych zawierających wapienny odpowiednio popiół lotny, żużel oraz pumeks.

3.2.2. Nieliniowe, wielokrotne analizy regresji (NWR)

Modele NWR opracowane w tej pracy przedstawiono poniżej.

W przypadku spoiw dwuskładnikowych próbek betonów otrzymanych w serii I:

where $\Delta v_{ij}(n)$ and $\Delta v_{ij}(n-1)$ – the weight increments between node i and j during the n^{th} and $(n-1)^{\text{th}}$ pass or epoch; δ – the learning rate; and α – the momentum factor.

In this study, *Binder content* (kg/m^3), *SF%*, *fly ash %*, *S%*, and *Age* (*day*) formed the input variables (x_i) for Series I concretes while the *strength* was the output variable (y_i) in the constructed three-layer FFNN. In the case of Series II concretes, the input variables were binder content, HRMK%, P% and age. The sigmoid function was employed as the activation function. Equations 3 and 4 are employed for computing the global error and updating the network weights, respectively. $\delta = 0.01$ was the learning rate; and $\alpha = 0.04$ was the momentum factor. The number of inner layer neurons was found by the trial and error procedure. Equation 5 was employed for condensing the data into the range of 0.1 to 0.9.

$$x_i = 0.1 + \frac{0.8(x_i - x_{min_i})}{(x_{max_i} - x_{min_i})} \quad [5]$$

where x_{max_i} and x_{min_i} are the maximum and minimum values of the i^{th} neuron in the input layer for all the feed data vectors, respectively.

3.2. Multiple Regression Analysis

The method of least squares was used for the regression analyses. The approach used to obtain initial estimates of the basic variables in each one-dimensional search was the linear extrapolation from a tangent vector. Forward derivatives were employed for the differentiating used to predict partial derivatives of the objective and constraint functions. The algorithm used in each iteration to determine the direction to search was the quasi-Newton method.

3.2.1. Multiple Linear Regression Analysis (MLR)

The MLR models constructed in this study are given below as:

For the binary binders of Series I concretes:

$$\text{Strength} = a + b_1 \cdot (\text{Binder content}) + b_2 \cdot (\text{SF}\%) + b_3 \cdot (\text{Age}) \quad [6]$$

For the ternary binders:

$$\text{Strength} = a + b_1 \cdot (\text{Binder content}) + b_2 \cdot (\text{SF}\%) + b_3 \cdot (\text{Age}) + b_4 \cdot (\text{FA/F}\%) \quad [7]$$

where a , b_1 , b_2 , b_3 , and b_4 are model coefficients whose optimal values were obtained using the corresponding calibration data sets. Note that in Equation 6 and 7, SF is replaced with HRMK in the case of Series II concretes, and FA/F in Equation 7 is replaced with FA/C, S or P for the ternary blends containing Class C fly ash, slag, and pumice, respectively.

3.2.2. Nonlinear Multiple Regression (NLMR) Analyses

The models for the NLMR analyses constructed in this study are as follows:

For the binary binders of Series I concretes:

$$\begin{aligned} \text{Wytrzymałość} = & a + b_1 \cdot (\text{zawartość spoiwa}) + \\ & b_2 \cdot (\text{zawartość spoiwa})^{c_1} + b_3 \cdot (\text{PK}\%) + b_4 \cdot (\text{PK}\%)^{c_2} + \\ & b_5 \cdot (\text{czas}) + b_6 \cdot (\text{czas})^{c_3} \end{aligned} \quad [8]$$

W przypadku spoiw trójskładnikowych:

$$\begin{aligned} \text{Wytrzymałość} = & a + b_1 \cdot (\text{zawartość spoiwa}) + \\ & b_2 \cdot (\text{zawartość spoiwa})^{c_1} + b_3 \cdot (\text{PK}\%) + b_4 \cdot (\text{PK}\%)^{c_2} + \\ & b_5 \cdot (\text{czas}) + b_6 \cdot (\text{czas})^{c_3} + b_7 \cdot (\text{PI/N}\%) + b_8 \cdot (\text{PI/N}\%)^{c_4} \end{aligned} \quad [9]$$

Najkorzystniejsze wartości współczynników (a , $b_1 - b_8$ i $c_1 - c_4$) opracowanych modeli otrzymano przy wykorzystaniu odpowiadającego im zbioru danych kalibracyjnych. Pk w równaniach 8 i 9 jest zastępowane przez MKWR w przypadku próbek betonu otrzymanych w serii II, a PI/N w równaniu 9 jest zastępowane przez PI/w, Ż lub P w betonach ze spoiwa trójskładnikowego zawierającego odpowiednio popiół lotny wapienny, żużel i pumeks.

4. Wyniki i ich omówienie

4.1. Wyniki doświadczeń

Krótkie posumowanie głównych wyników obejmujących otrzymane w seriach I i II próbki betonów omówiono w dalszej części artykułu. Szczegółowa dyskusja i zmierzona wytrzymałość na ściskanie próbek betonu należących do serii I można znaleźć we wcześniejszej pracy (27).

Series I

Wytrzymałość próbek betonu ze spoiwa CP + Pk była znacznie wyższa od próbek otrzymanych tylko z CP jako spoiwa, przy założeniu, że dodana ilość Pk została odpowiednio dobrana. Po przekroczeniu pewnej ilości bardzo drobne cząstki Pk zwiększają właściwą ilość wody mieszanek betonowych, co pociąga za sobą spadek wytrzymałości. W przypadku stosowania w odpowiedniej ilości on zwiększa wytrzymałość w wyniku oddziaływania fizycznego (efekt wypełniacza i centra zarodkujące) i chemicznego (puzolanowa reakcja). Dodatek trzeciego spoiwa powoduje dalsze zwiększenie wytrzymałości, lecz znowu pod warunkiem, że jest on zastosowany w odpowiedniej ilości. Zanotowano zwiększenie wytrzymałości aż o 47% w przypadku PI/w po 28 dniach, przy x ogólnym dodatku spoiwa wynoszącym 650 kg/m³. Porównanie dwuskładnikowych i trójskładnikowych spoiw pokazuje, że wpływ trzeciego spoiwa [PI/k, PI/w lub Ż] na wytrzymałość był większy po 7 i 28 dniach niż po 3 dniach, w związku wolną reakcją tych spoiw. Porównanie PI/k, PI/w i Ż pokazuje, PI/w miał największy wpływ na wytrzymałość. Wysoką wytrzymałość wynoszącą 107 MPa można otrzymać przy dodatku PI/w. Wpływ Ż na wytrzymałość był większy niż PI/k. Niemniej jednak można było uzyskać wytrzymałość większą niż 90 MPa stosując Ż i PI/k.

Series II

MKWR stosowany w odpowiednich ilościach zwiększa wytrzymałość betonu z BCP. Jednak analogicznie jak w przypadku Pk w próbkach betonów otrzymanych w serii I, zastępowanie pewnej

$$\begin{aligned} \text{Strength} = & a + b_1 \cdot (\text{Binder content}) + \\ & b_2 \cdot (\text{Binder content})^{c_1} + b_3 \cdot (\text{SF}\%) + b_4 \cdot (\text{SF}\%)^{c_2} + \\ & b_5 \cdot (\text{Age}) + b_6 \cdot (\text{Age})^{c_3} \end{aligned} \quad [8]$$

For the ternary binders:

$$\begin{aligned} \text{Strength} = & a + b_1 \cdot (\text{Binder content}) + \\ & b_2 \cdot (\text{Binder content})^{c_1} + b_3 \cdot (\text{SF}\%) + b_4 \cdot (\text{SF}\%)^{c_2} + \\ & b_5 \cdot (\text{Age}) + b_6 \cdot (\text{Age})^{c_3} + b_7 \cdot (\text{FA/F})^{c_3} + b_8 \cdot (\text{FA/F})^{c_4} \end{aligned} \quad [9]$$

The optimal values of the coefficients (a , $b_1 - b_8$ and $c_1 - c_4$) of the constructed models were obtained using the corresponding calibration data sets. SF in Equation 8 and 9 is replaced with HRMK in the case of Series II concretes, and FA/F in Eq. 9 is replaced with FA/C, S or P for the ternary blends containing Class C fly ash, slag, and pumice, respectively.

4. Results and discussions

4.1. Experimental results

A brief summary of the major results for Series I and II concretes is given below. The detailed discussion of the measured compressive strengths for Series I concretes can be found elsewhere (27).

Series I

The strength of PC+SF concretes were significantly higher than those of the concretes containing only PC as a binder provided that the added amount is selected properly. After a certain amount, very fine particles of SF increase the water demand of the concrete mixes and cause strength loss. When used in proper amounts, it contributes to strength by physical (filler effect and nucleation site) and chemical (pozzolanic) effects. The addition of the third binder increased the strength further but again under the condition that it is used in proper amounts. Strength improvements up to 47% were recorded with FA/C at 28 days for 650 kg/m³ of total binder content. A comparison of binary binders and ternary binders shows that the contribution of the third binder (FA/F, FA/C or S) to strength was more significant at 7 and 28 days than for 3 days, due to the slow reactions of these binders. When FA/F, FA/C and S are compared, it was found that it was FA/C which had the higher effect on strength. Strength as high as 107 MPa could be obtained with FA/C. The effect of S on strength was higher than FA/F. Nevertheless, it was possible to obtain strength higher than 90 MPa with both S and FA/F.

Series II

When used in proper amounts, HRMK increases the strength of the WPC concrete. However, as it was in the case for SF in Series I concretes, after a certain amount of replacement, it causes strength decrease due to the higher water demand of the concrete mixtures of constant consistency. The higher water demand results from very fine particles of the HRMK. The benefit of using HRMK on strength can be explained again by physical and chemical effects in the paste. Besides, these effects also improve the

Tablica 6 / Table 6

COEFFICIENTS IN THE MULTIPLE REGRESSION ANALYSES

Binder Type	Regression Type	A	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
PC+SF	MLR	24.2	0.04	0.83	0.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NLMR	15.3	-0.15	0.01	-12.66	14.34	-0.09	39.95	-	-	1.47	0.98	0.12	-
WPC+HRMK	MLR	58.0	0.00	-0.20	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NLMR	-118.8	0.47	-0.14	-22.5	24.6	-0.48	124.1	-	-	1.17	0.97	0.07	-
PC+SF+FA/F	MLR	41.4	0.03	-0.34	0.89	-0.21	-	-	-	-	-	-	-	-
	NLMR	8.3	0.18	-0.04	-0.33	2.16	-3.75	17.00	-13.00	1.80	1.16	-0.98	0.66	0.96
PC+SF+FA/C	MLR	30.2	0.05	-0.45	0.84	0.19	-	-	-	-	-	-	-	-
	NLMR	8.4	0.16	-0.05	-0.43	1.82	-2.60	12.73	-15.02	2.08	1.10	-2.72	0.66	0.96
PC+SF+S	MLR	32.2	0.03	0.47	0.76	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-
	NLMR	7.7	0.06	-0.15	0.34	1.18	-1.14	25.90	-20.93	2.74	0.82	0.42	0.37	1.00
WPC+HRMK+P	MLR	40.5	0.03	0.06	0.62	-0.48	-	-	-	-	-	-	-	-
	NLMR	7.8	0.13	-0.05	0.39	20.21	-2.76	18.10	-12.72	1.64	1.09	-0.59	0.57	0.99

Tablica 7 / Table 7

ERROR ANALYSES OF THE PREDICTION METHODS

Binder type	Analysis type	MRE %	MAE MPa	RMSE MPa
PC+SF	MLR	4.58	2.68	3.31
	NLMR	4.50	2.57	3.06
	ANN	4.41	2.58	3.19
WPC+HRMK	MLR	6.63	4.06	4.74
	NLMR	5.71	3.42	4.20
	ANN	5.58	3.47	4.37
PC+SF+FA/F	MLR	6.94	4.40	5.43
	NLMR	5.97	3.79	4.66
	ANN	5.71	3.73	4.91
PC+SF+FA/C	MLR	7.55	5.60	6.55
	NLMR	6.55	4.66	5.53
	ANN	5.58	4.15	5.38
PC+SF+S	MLR	7.10	4.62	6.19
	NLMR	5.88	3.86	5.60
	ANN	6.20	3.98	5.08
WPC+HRMK+P	MLR	7.57	4.10	4.89
	NLMR	5.33	3.06	3.50
	ANN	6.47	3.45	4.57

ilości cementu powoduje zmniejszenie wytrzymałości w związku z większą wodożądnością mieszanek betonowych o stałej konsystencji. Ta większa wodożądność wynikała z dużego rozdrobnienia MKWR. Korzystny wpływ na wytrzymałość ze stosowania MKWR można także wyjaśnić jego fizycznym i chemicznym oddziaływaniem. Wpływ ten obejmuje także poprawę mikrostruktury strefy przejściowej kruszywo-zaczyn, która jest znacznie ważniejsza w przypadku BWW niż zwykłego betonu. Dodatek P razem z MKWR w przypadku białego betonu zwykle zmniejsza wytrzy-

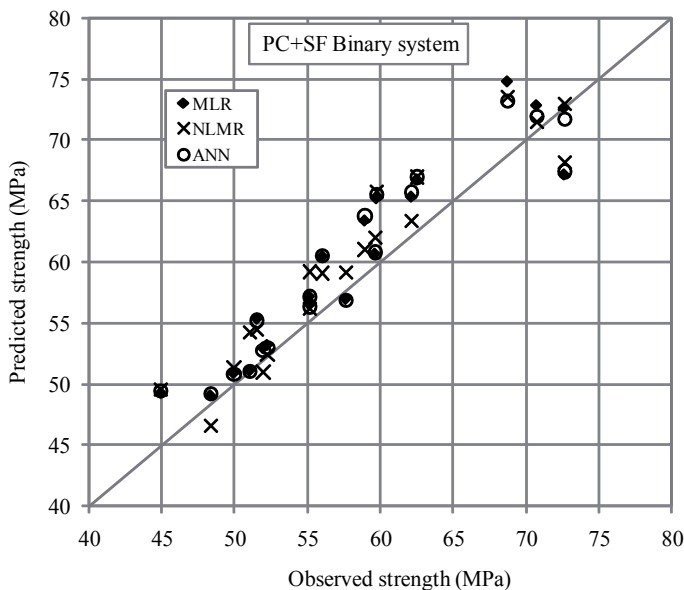
paste-aggregate interface which is much more important in HSC than for NSC. The use of P with HRMK in white concrete generally decreases strength due to the porous nature of the P which increases water demand. However, the strength loss decreased in time due to ongoing pozzolanic reactions. For the cases where early strength is not a concern, the use of ground P can be a good solution for producing high strength white concrete with lower cost and improved durability (1). Finally, it is found that the higher binder content does not always increase the strength of concrete and can decrease the durability and cause shrinkage problems.

4.2. Strength predictions model

As stated earlier, predictions of strength of HSC concretes from binary and ternary binders were performed with three methods: ANN, MLR and NLMR. The determined optimal values of the coefficients in Equations 6—9 are presented in Table 6. The mean relative error (MRE), root mean squared error (RMSE) and mean absolute error (MAE) for each prediction method are presented in Table 7.

The testing and validation data (for ANN and multiple regressions, respectively) for the binary system of Series I concretes and the corresponding predicted strength are shown in Fig. 2. As seen from this figure, models slightly overpredicted the measured data in most cases. All the models yielded close values to each other. This is also confirmed by the results depicted in Table 7 that the MRE, RMSE and MAE values since the testing and validation data did not vary significantly with the prediction method. Therefore it can be concluded that MLR, NLMR and ANN give similar results for the binary systems. It is worth mentioning that MRE values were lower than about 4.5%, and the RMSE and MAE values were lower than 3.3 MPa.

The observed vs. predicted strength for the Series II concretes with binary binders are shown in Fig 3. The MRE, RMSE and



Ryc. 2. Prognozowana wytrzymałość betonu z CP i Pk, porównanie z danymi sprawdzającymi

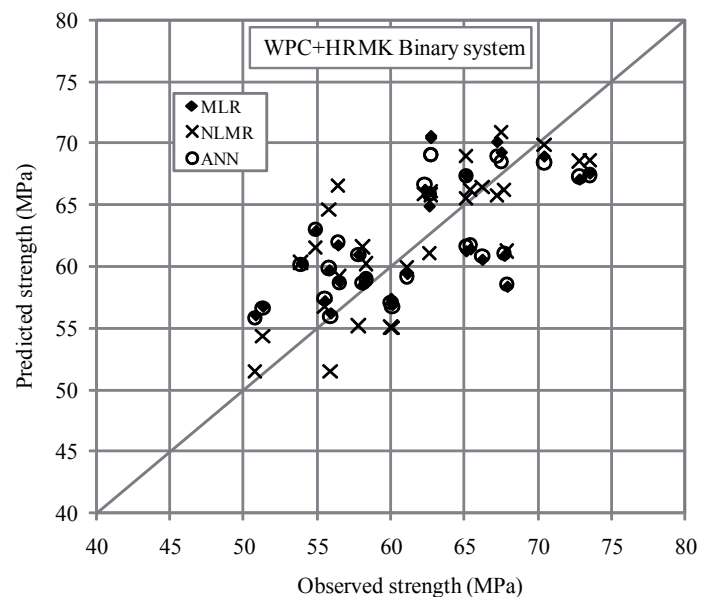
Fig. 2. Prediction of concrete strength from PC+SF binder for testing and validation data

małość z powodu dużej porowatości P, co zwiększa wodożądność. Jednak spadek wytrzymałości maleje z czasem w związku z zachodzącą reakcją pucolanową. W przypadkach gdy wczesna wytrzymałość nie ma znaczenia dodatek mielonego P może być dobrym rozwiązaniem w produkcji białego betonu o dużej wytrzymałości, zapewniającym zmniejszenie kosztów i poprawę trwałości (1). W końcu stwierdzono, że większa zawartość spoiwa nie zawsze pociąga za sobą wzrost wytrzymałości betonu, a może zmniejszyć trwałość i spowodować problemy ze skurczem.

4.2. Modele do prognozowania wytrzymałości

Jak o tym wspomniano wcześniej opracowano trzy modele do prognozowania wytrzymałości BWW ze spoiw dwu i trójskładnikowych: SSN, WRL i NWR. Oznaczone najkorzystniejsze wartości współczynników w równaniach 6 – 9 podano w tablicy 6. Średni względny błąd [ŚWB], błąd średni kwadratowy [BŚK] i średni błąd bezwzględny [ŚBB] dla wszystkich metod prognozowania podano w tablicy 7.

Dane stosowane do sporządzenia i sprawdzenia modeli SSN i wielokrotnej regresji w przypadku betonów ze spoiw dwuskładnikowych należących do serii I i odpowiadające im prognozowane wytrzymałości pokazano na rysunku 2. Jak można zobaczyć na tym rysunku w większości przypadków wyniki otrzymane za pomocą modeli są nieznacznie większe od danych doświadczalnych. Natomiast wyniki uzyskane za pomocą modeli różnią się nieznacznie. Potwierdzają to także wyniki zebrane w tablicy 7, z których wynika, że obliczone błędy ŚWB, BŚK i ŚBB nie różnią się zbytnio w przypadku danych stosowanych do sporządzenia i sprawdzania modeli. W związku z tym można stwierdzić, że obliczone błędy SSN, WLR i NWR dają podobne wyniki w przypadku spoiw dwuskładnikowych. Warto podkreślić, że wielkość



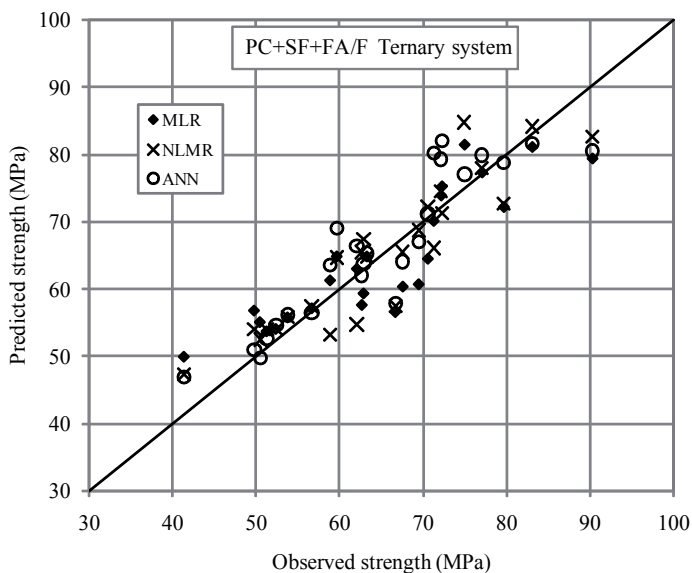
Ryc. 3. Prognozowana wytrzymałość betonu z BCP i Pk, porównanie z danymi sprawdzającymi

Fig. 3. The prediction of concrete strength of the WPC+HRMK binder for testing and validation data

MAE values for each prediction method are given in Table 7. As it can be seen, the NLMR and ANN performance were better than MLR. The comparison of Series I and II concretes containing binary binders shows that the predictions were better for Series I concretes (Table 7).

Figs. 4 – 7 show the prediction of the PC+SF+FA/F, PC+SF+FA/C, PC+SF+S and WPC+HRMK+P ternary binders, respectively. The data used in these figures are testing and validation data. As seen in Figs 4-7, the models in general show satisfactory performance. In Fig. 6, although all methods produced comparable values to each other and showed satisfactory performance in predicting measured data, only 4 out of 25 observed strength between 65 and 75 MPa were overpredicted as between 77 and 83 MPa. This may be caused by the experimental errors for those particular samples. Table 7 gives the MRE, RMSE and MAE values for each prediction method. According to the table, MLR analyses resulted in the highest errors (MAE, RMSE and MRE) in all ternary systems. Generally speaking, NLMR and ANN showed similar performance but NLMR seems to be more appropriate to PC+SF+S and WPC+HRMK+P systems, whereas ANN is slightly better for PC+SF+FA/F and PC+SF+FA/C systems.

When the performance of the prediction methods were compared for binary and ternary binders of Series I concretes, it is seen that the prediction of the strength of binary systems were more successful than for the ternary systems. The errors calculated for the binary binders were lower than for the ternary systems. This result is expected since the material became more complex in the case of three-component binders (as explained in the first point), resulting in a more difficult task to predict the strength. In the case of series II concretes, the performance of the prediction methods did not change significantly with the binder system.

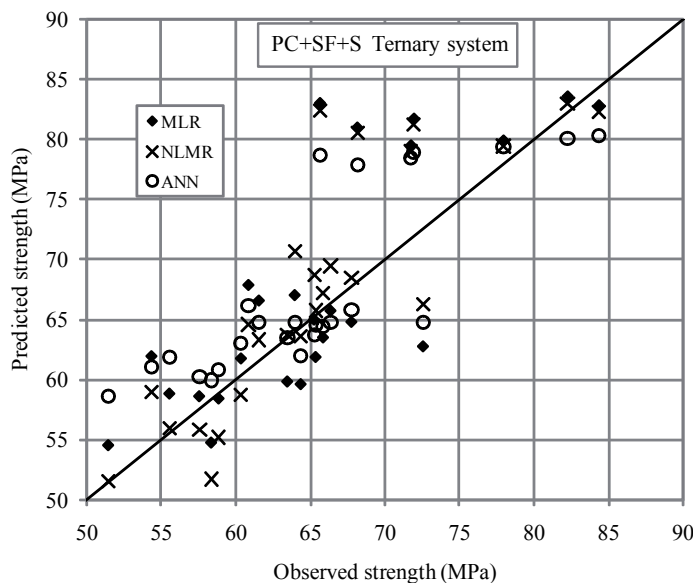


Ryc. 4. Prognozowana wytrzymałość betonu ze spoiwa CP+Pk+PIN oraz dane sprawdzające

Fig. 4. Prediction of concrete strength of the PC+SF+FA/F binder for testing and validation data

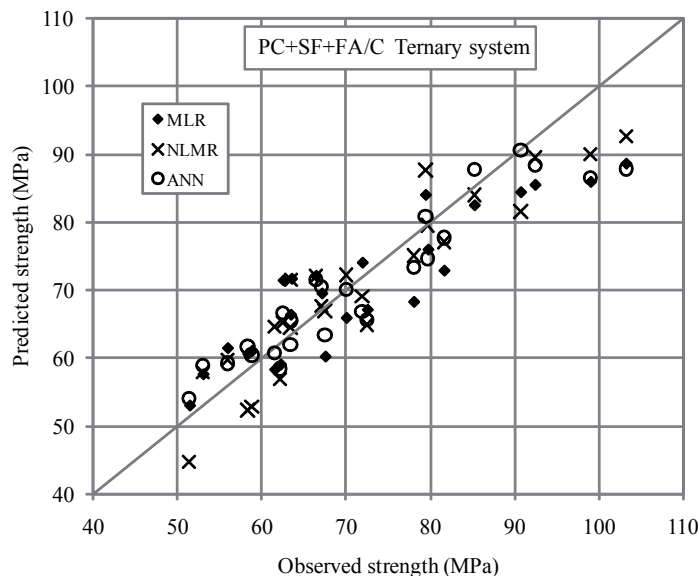
ŚWB była niższa od 4,5%, a wielkości BŚK i ŚBB były mniejsze od 3,3 MPa.

Stwierdzone oraz prognozowane wytrzymałości próbek betonowych wytworzonych w serii II ze spoiw dwuskładnikowych pokazano na rysunku 2. BŚK, ŚBK i ŚBB w przypadku każdej metody zastosowanej do prognozowania podano w tabelicy 7. Jak można stwierdzić modele NWR i SSN były lepsze niż WLR. Porównanie wyników prognozowania wytrzymałości próbek betonu ze spoiw dwuskładnikowych uzyskanych w serii I i II wykazują, że prognozowanie dało lepsze wyniki w przypadku serii I (tabela 7).



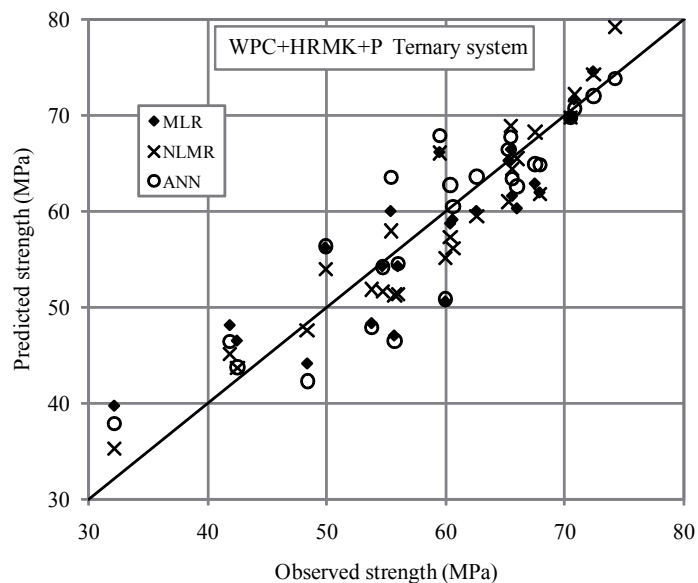
Ryc. 6. Prognozowana wytrzymałość betonu ze spoiwa CP+Pk+Ż oraz dane sprawdzające

Fig. 6. The prediction of the concrete strength from the PC+SF+S binder for testing and validation data



Ryc. 5. Prognozowana wytrzymałość betonu ze spoiwa CP+Pk+PI/w oraz dane sprawdzające

Fig. 5. The prediction of concrete strength from the PC+SF+FA/C binder for testing and validation data



Ryc. 7. Prognozowana wytrzymałość betonu ze spoiwa BCP+MKDR+P oraz dane sprawdzające

Fig. 7. The prediction of the concrete strength of the WPC+HRMK+P binder for testing and validation data

Finally, as an extra work, all of the prediction methods were applied once more by using the water amount and aggregate contents in the HSCs as input. However, including these inputs in the analyses did not improve the results; i.e. the errors did not decay. Therefore, these types of analyses were not included in this paper.

5. Conclusions

The following conclusions can be drawn from this study:

Na rysunkach 4 – 7 pokazano prognozowanie wytrzymałości próbek betonu otrzymanych ze spoiw trójskładnikowych: Cp + Pk + PI/w, CP + Pk + PI/w, CP+ Pk + Ż i BCP + MKWR + P. Dane wykorzystane na tych rysunkach obejmują wyniki wykorzystane w badaniach i sprawdzaniu modeli. Jak to wynika z rezultatów pokazanych na tych rysunkach modele dają zadowalające prognozy. Omawiając wyniki pokazane na rysunku 6 można stwierdzić, że wszystkie modele dają porównywalne i bliskie sobie prognozy otrzymanych wytrzymałości, jedynie 4 z 25 zmierzonych wielkości o wytrzymałości od 65 do 75 MPa przewidywały większą wytrzymałość wynoszącą od 77 do 83 MPa. W przypadku tych próbek może to być spowodowane błędami doświadczalnymi. W tablicy 7 podano następujące błędy: BŚK, ŚBK i ŚBB obejmujące prognozy uzyskane przy zastosowaniu wszystkich modeli. Jak wynika z danych podanych w tej tablicy największe błędy (BŚK, ŚBK i ŚBB) dotyczą prognoz uzyskanych za pomocą WLR, w przypadku wszystkich próbek betonów ze spoiw trójskładnikowych. Natomiast można stwierdzić ogólnie, że SSN i NWR dały podobne wyniki, jednak NWR wydaje się bardziej dokładny w przypadku próbek betonów ze spoiw CP + Pk + Ż i BCP + MKWR + P, podczas gdy SSN jest nieco lepszy w przypadku próbek ze spoiw CP + Pk + PI/k i CP + Pk + PI/w.

Z porównania dokładności modeli prognostycznych w odniesieniu do próbek betonu uzyskanych w serii I ze spoiw dwu i trójskładnikowych wynika, że uzyskano lepsze prognozy w przypadku próbek ze spoiw dwuskładnikowych niż trójskładnikowych. Tego wyniku można było oczekiwać, gdyż skład betonu jest bardziej złożony w przypadku spoiw trójskładnikowych (jak to wyjaśniono w pierwszym punkcie), co czyni prognozę wytrzymałości trudniejszą do rozwiązania. W przypadku próbek betonu uzyskanych w serii II dokładność modeli prognostycznych nie zależy w dużym stopniu od ilości spoiw.

Jako zadanie dodatkowe wykorzystano modele stosując ilość wody zarobowej i zawartość kruszywa w BWW, jako dane wejściowe. Zastosowanie tych danych wejściowych w analizie nie poprawiło jednak uzyskiwanych wyników, to znaczy poziom błędów nie uległ zmniejszeniu. Z tego względu te wyniki nie zostały wprowadzone do treści pracy.

5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- 1) Zastosowany w odpowiedniej ilości MKWR zwiększa wytrzymałość białego betonu.
- 2) Pomimo, że dodatek P razem z MKWR w betonie białym generalnie zmniejsza wytrzymałość, jednak to pogorszenie wytrzymałości zmniejsza się w czasie, ze względu na zachodzenie reakcji pucolanowej. W przypadkach, gdy wczesna wytrzymałość nie odgrywa większej roli stosowanie P może być dobrym rozwiązaniem w produkcji białego betonu o wysokiej wytrzymałości przy małych kosztach i lepszej trwałości.

- 1) When used in proper amounts, HRMK increases the strength of the WPC concrete.
- 2) Although the use of ground P with HRMK in white concretes generally decreases strength, the strength decrease became lower with time due to ongoing pozzolanic reaction. For the cases when early strength is not a concern, the use of P can be a good solution for producing high strength white concrete with lower cost and improved durability.
- 3) MLR, NLMR and ANN gave comparable results in predicting the strength of the binary systems, in Series I concretes. However, in the case of Series II concretes having binary binders, NLMR and ANN was superior to MLR.
- 4) When the accuracy of prediction is compared for both binder systems, it was found that the strength of PC+SF concretes was predicted better than that of WPC+HRMK concretes.
- 5) Similarly as for binary systems in Series I concretes, in all of the ternary binder systems, the performance of NLMR and ANN in the strength predicting was found to be comparable to each other and better than the MLR. NLMR is slightly better for PC+SF+S and WPC+HRMK+P systems, whereas ANN may be suitable for PC+SF+FA/F and PC+SF+FA/C systems.
- 6) For Series I concretes, the prediction of the strength of binary systems was more successful than for the ternary one. In the case of Series II concretes, the level of prediction applying different methods did not change significantly with the binder system.
- 7) Increasing the number of inputs by including the water amount and aggregate contents in the analyses did not improve the prediction with different methods.
- 8) This study showed that ANN and multiple regression methods can successfully be used to predict the strength of the binary and ternary systems, which can help reduce time, manpower, materials, and cost of the concrete required for testing.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank ÇimSA Cement Production and Trading Co., Mersin, Turkey for the support.

Literatura / References

1. Ö. Kırca, M. Şahin, T. K. Erdem, Corrosion resistance of white Portland cement: The effects of pozzolanic admixtures, in: IXth ICCP International corrosion symposium and exhibition, pp. 432-440, Ankara, Turkey 2004.
2. J. T. Ding, Z. Li, Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete, *ACI Mater J* **99**, pp. 393-398 (2002).
3. C. S. Poon, L. Lam, S. C. Kou, Y. L. Wong, R. Wong, Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes, *Cem. Concr. Res.* **31**, pp. 1301-1306 (2001).
4. R. Şahin, R. Demirboğa, H. Uysal, R. Gül, The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete, *Cem. Concr. Res.* **33** (2003)1245-1249 (2003).
5. D. Sari, O. Çankıran, A. Sarışık, The optimum granulometry of the pumice aggregate at which the admixture is effective, in: *Cement and Concrete Technology in the 2000's*, pp.134-143, Istanbul, Turkey 2000.

- 3) Modele NWR, WLR i SSN dają porównywalne wyniki w przypadku prognozowania wytrzymałości betonów ze spoiw dwuskładnikowych otrzymanych w serii I Natomiast w przypadku próbek betonów ze spoiw dwuskładnikowych uzyskanych w serii II NWR i SSN dają lepsze wyniki niż WLR.
- 4) Porównanie dokładności prognoz w zastosowaniu do dwóch układów spoiw pokazuje, że wytrzymałość betonów ze spoiwa CP + Pk jest lepsza niż w przypadku kompozytów ze spoiw BPC + MKWR.
- 5) Podobnie jak w przypadku próbek betonów ze spoiw dwuskładnikowych w serii I, również w przypadku próbek ze spoiw trójskładnikowych dokładność prognoz dotyczących wytrzymałości, modele NWR i SSN dają porównywalne wyniki, które są dokładniejsze niż wyznaczone z modelu WRL. NWR daje nieco lepsze wyniki w przypadku spoiw PC + Pk + Ż i BCP + MKWR + P, podczas gdy prognozy przy zastosowaniu SSN są dokładniejsze w przypadku spoiw CP + Pk + PI/k oraz CP + Pk + PI/w.
- 6) W przypadku betonów ze spoiw dwuskładnikowych otrzymanych w serii I prognozy wytrzymałości są dokładniejsze niż dla spoiw trójskładnikowych. W przypadku serii II na dokładność prognoz uzyskanych przy zastosowaniu różnych modeli nie zależy w sposób wyraźny od składu spoiw.
- 7) Zwiększenie zmiennych wejściowych przez wprowadzenie zawartości wody i kruszywa w analizach nie powoduje poprawy różnych stosowanych modeli prognostycznych.
- 8) Praca wykazała, że SSN i wielokrotne analiza regresji mogą być z powodzeniem zastosowane do opracowania modeli prognozujących wytrzymałość próbek betonu ze spoiw dwu i trójskładnikowych, które mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu BWW dając oszczędność czasu, robocizny, materiałów i kosztów materiałowych, które musiałyby być poniesione przy wykonywaniu zarobów próbnych.
6. V. M. Malhotra, A. A. Ramezianpour, Fly ash in concrete. CANMET, Ottawa 1994.
7. S. Mindess, J. F. Young, D. Darwin, Concrete, Prentice-Hall Englewood Cliffs (NJ), 2003.
8. R. P. Khatri, V. Sirivivatnanon, W. Gross, Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete, *Cem. Concr. Res.* **25**, pp. 209-220 (1995).
9. D. M. Roy, Hydration of blended cements containing slag, fly ash, or silica fume, in: *Proceedings of meeting institute of concrete technology*, Coventry, pp. 29-31, UK 1987.
10. A. M. Neville, Properties of concrete, Essex: Pearson Education Asia Pte Ltd, 2000.
11. P. K. Mehta, O. E. GjØrv, Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica fume, *Cem. Concr. Res.* **12**, pp. 587-595 (1982).
12. C. Ozyildirim, W. J. Halstead, Improved concrete quality with combinations of fly ash and silica fume, *ACI Mater J* **91**, pp. 587-594 (1994).
13. M. D. A. Thomas, M. H. Shehata, S. G. Shashiprakash, D. S. Hopkins, K. Cail, Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete, *Cem. Concr. Res.* **29**, pp. 1207-1214 (1999).
14. D. S. Lane, C. Ozyildirim, Preventive measures for alkali-silica reactions (binary and ternary systems), *Cem. Concr. Res.* **29**, pp. 1281-1288 (1999).
15. K. Tan, X. Pu, Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag, and their combination, *Cem. Concr. Res.* **28**, pp. 1819-1825 (1998).
16. G. Li, X. Zhao, Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag, *Cem. Concr. Comp.* **25**, pp. 293-299 (2003).
17. L. Jianyong, T. Pei, Effect of slag and silica fume on mechanical properties of high strength concrete, *Cem. Concr. Res.* **27**, pp. 833-837 (1997).
18. M. R. Jones, R. K. Dhir, B. J. Magee, Concrete containing ternary blended binders: resistance to chloride ingress and carbonation, *Cem. Concr. Res.* **27**, pp. 825-831 (1997).
19. A. L. A. Fraay, J. M. Bijen, Y. M. de Haan, The reaction of fly ash in concrete: a critical examination, *Cem. Concr. Res.* **19**, pp. 235-246 (1989).
20. ACI Committee 211. Guide for selecting proportions for high strength concrete with Portland cement and fly ash, *ACI Mater J* **90**, pp. 272-283 (1993).
21. İ. B. Topçu, M. Sarıdemir, Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic, *Computational Materials Science* **41**, pp. 305-311 (2008).
22. N. Hong-Guang, W. Ji-Zong, Prediction of compressive strength of concrete by neural networks, *Cem. Concr. Res.* **30**, pp. 1245-1250 (2000).
23. A. Öztaş, M. Pala, E. Özbay, E. Kanca, N. Çağlar, M. A. Bhatti, Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network, *Constr. Build. Mater.*, **20**, pp. 769-775 (2006).
24. I. C. Yeh, Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks, *Cem. Concr. Res.* **28**, pp. 1797-1808 (1998).
25. W. P. S. Dias, S. P. Pooliyadda, Neural networks for predicting properties of concretes with admixtures, *Constr. Build. Mater.* **15**, pp. 371-379 (2001).
26. J. Kasperkiewicz, J. Racz, A. Dubrawski, HPC strength prediction using artificial neural network, *ASCE J. Comput. Civil. Eng.* **9**, pp. 279-284 (1995).
27. T. K. Erdem, Ö. Kırca, Use of binary and ternary blends in high strength concrete. *Constr. Build. Mater.*, **22**, pp. 1477-1483 (2008).
28. The ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, *Artificial Neural Networks in Hydrology I: Preliminary Concepts*, *J. Hydrologic. Eng.*, **5**, pp. 115-123 (2000).