

Poszukiwanie składu betonu samozagęszczającego się z wykorzystaniem modeli statystycznych

Searching of self-compacting concrete composition with the statistical models

1. Wprowadzenie

Betony samozagęszczające się (BSZ) otrzymuje się z mieszanek, które wykazują zdolność do płynięcia i zagęszczania się bez wibracji, a także szczelnego wypełniania formy, nawet w konstrukcjach z gęstym zbrojeniem (1–3). Najważniejszymi właściwościami BSZ są: rozptył mieszanki betonowej pod wpływem własnego ciężaru, samoczynne poziomowanie i odpowietrzanie przy równoczesnym braku segregacji. Warunek samozagęszczania się powoduje konieczność stosowania specjalnego składu betonu. Przede wszystkim zmniejszenie maksymalnej wielkości ziarna, zwiększenie punktu piaskowego oraz wprowadzenie domieszek chemicznych. Zwiększenie udziału składników pylastych uzyskuje się dzięki stosowaniu dodatków mineralnych, głównie popiołu lotnego, mielonego piasku kwarcowego itp. Te składniki złożone z drobnych ziaren zwiększają lepkość mieszanki betonowej oraz zmniejszają tendencję do segregacji kruszywa grubego (1, 2).

Projektowanie składu betonów samozagęszczających się, podobnie jak innych materiałów wieloskładnikowych – układów złożonych, musi uwzględniać kilka warunków wyjściowych, a mianowicie :

1. zapewnienie żądanych właściwości betonu, przy utrzymaniu korzystnych kosztów,
2. uwzględnianie kilku wariantów składu, pozwalających na osiągnięcie założonego celu.
3. uwzględnianie ograniczeń w stosunku do składów, technologii, środków i tp.

Trudności w ustalaniu optymalnego składu BSZ wynikają z wieloskładnikowej receptury, wielości kryteriów oceny jakości mieszanki betonowej oraz konieczności równoczesnego spełniania przez beton wielu wymagań. Złożoność opracowania i analizy BSZ wzrasta między innymi także w związku z tym, że praktycznie nie ma powszechnie stosowanej metody ustalania ich składu, a wymagania dotyczące oceny jakości mieszanek oparte są na nowych metodach („L-Box Test”, „V-Funnel Test”), naśladujących zachowanie się mieszanki w konstrukcji (1-4).

1. Introduction

Self-compacting concretes (SCC) are produced from the mixtures, which show the ability to flow and compact without vibration, and to fill all space within the formworks, even in constructions with closely spaced reinforcement (1-3). In the case of SCC the most important features of concrete mixture are the following: flow under the self weight, self-leveling and expelling entrapped air with simultaneous lack of segregation. To assure the self-compacting ability a special concrete composition is demanded, primarily coarse aggregate content decreasing, the sand content increasing and superplasticizers application. The powder content increase is assured through mineral additions application, chiefly fly ash, ground quartz sand and limestone. These ingredients composed of fine grains increase the plastic viscosity of concrete mix and decrease the tendency of coarse aggregate segregation (1, 2).

The difficulties of optimum SCC composition are caused by the high quantity of quality assessment criterions and of the necessity of concrete fulfilling several requirements. The SCC analysis complexity is rising among other because there is no practically established method of their composition determination. The assessment of concrete mixtures quality are based on new testing methods (L-Box test, V-Funnel test), emulating the mix behaviour in construction (1-4).

The designing of SCC composition, similarly as another multicomponent materials, must take into account some initial conditions, namely:

1. fulfilling the required concrete properties by keeping beneficial financial exposes
2. respecting some concrete composition variants, assuring to meet the established goal. Therefore, the concrete composition searching should take advantage of complex statistical mathematical methods (5).

The multicomponent system and multicriterial quality requirements make that SCC's are right object for statistical modelling and mul-

W związku z tym, opracowanie składu BSZ powinno opierać się na podejściu systemowym, wykorzystaniu metod statystycznych, z rozbudowanym aparatem matematycznym (5, 6).

Wieloczynnikowy układ i znaczna liczba kryteriów jakości powodują, że BSZ stanowią właściwy obiekt do eksperymentalno-statystycznego modelowania i wielokryterialnej optymalizacji, szczególnie przy ocenie możliwości wykorzystania nowych składników mieszanki (5).

2. Zastosowanie ES-modeli do analizy właściwości betonu w funkcji jego składu

Do analizy wpływu różnych czynników i optymalizacji składu BSZ wykorzystano ES- modele, opracowane w wyniku 27 doświadczeń, realizowanych zgodnie z planem eksperymentu Ha₅(5). Wartości zmiennych wejściowych zmieniały się na trzech unormowanych poziomach ($x_i = -1; 0; +1$).

Do grupy czynników wpływających na właściwości matrycy cementowej zaliczono domieszkę superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksylianowych ($SP = x_1 = 1,4 \pm 0,4\%$ w stosunku do masy cementu) oraz zawartość dodatku mineralnego złożonego z frakcji pylastej, którym był popiół lotny ($PI = x_2 = 30 \pm 10\%$).

W doświadczeniach stosowano popiół lotny ze spalania węgla kamiennego w elektrowni „Kwidzyn”, o zawartości niespalonego węgla 4,4% i powierzchni właściwej około 300 m²/kg. Dodatek popiołu o dużej mialkości powinien zwiększyć zawartość zaczynu wypełniającego jamy w stosie okrucowym kruszywa oraz zwiększyć lepkość plastyczną mieszanki, w celu obniżenia tendencji do jej segregacji.

Jako trzeci czynnik, wpływający na właściwości matrycy cementowej, wybrano stosunek wodno-cementowy ($w/c = x_3 = 0,46 \pm 0,03$). Zakres zmian $w/c = 0,43 \pm 0,46$ wybrano w oparciu o dane literaturowe i wyniki wstępnych prób, w kilku najbardziej kontrastowych punktach planu. Zawartość wody w mieszankach zmieniała się od 172 do 196 dm³/m³, z kolei zawartość cementu była stała ($C = 400$ kg/m³). W badaniach stosowano cement CEM I 42,5 N-HSR/NA, z cementowni „Rejowiec”.

Właściwości stosu okrucowego zmieniano poprzez regulację zawartości piasku ($Pp = x_4 = 50 \pm 5\%$) i drobnej frakcji żwiru 4/8 mm ($\check{Z}_d = x_5 = 60 \pm 20\%$) w mieszaniu ze żwirem grubym frakcji 8/16 mm.

ES-modele [1] przedstawiono w ogólnej postaci równania wyjściowej charakterystyki Y badanego obiektu (w wartości unormowanych standardowych zmiennych na poziomach od $x_i = -1$ do $x_i = +1$):

$$Y = \begin{array}{l} b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 \\ + b_2 x_2 + b_{22} x_2^2 + b_{23} x_2 x_3 \\ + b_3 x_3 + b_{33} x_3^2 \end{array} \quad (a) \quad \begin{array}{l} + b_{14} x_1 x_4 \\ + b_{15} x_1 x_5 \\ + b_{24} x_2 x_4 \\ + b_{25} x_2 x_5 \\ + b_{34} x_3 x_4 \\ + b_{35} x_3 x_5 \end{array} \quad (c)$$

$$+ b_4 x_4 + b_{44} x_4^2 + b_{45} x_4 x_5 + b_5 x_5 + b_{55} x_5^2 \quad (b)$$

trikriterialną optymalizacją, szczególnie o możliwości oceny nowych składników (4).

2. Application of statistic modelling for the analysis of concrete properties in relation to its composition

For different factors impact analysis and SCC composition optimisation the experiment outline Ha₅(5), embracing 27 experiments was applied. The standard values of input variables were ($x_i = -1; 0; +1$).

To the group of factors, influencing the properties of cement matrix, superplasticizer addition was included, which was composed of polycarboxylic ether ($SP = x_1 = 1.4 \pm 0.4\%$ by mass of cement) and the addition of mineral additive, which was fly ash ($FA = x_2 = 30 \pm 10\%$).

In the experiments fly ash from hard coal combustion in power plant “Kwidzyn”, with the content of uncombusted coal of 4.4% and specific surface area of about 300 m²/kg, was applied. The addition of ash of high fineness should increase the paste content, filling the gaps in granular skeleton of aggregate and to increase the plastic viscosity of mixture, in order to decrease the tendency for segregation.

As the third factor influencing on the properties of cement matrix the water to cement ratio was chosen ($w/c = x_3 = 0.46 \pm 0.03$). The change range of $w/c = 0.43 - 0.46$ on the basis of technical literature was chosen and confirmed by the results of preliminary experiments, in the most contrast points of plan. The water content in concrete mixtures changed from 172 to 196 dm³/m³, but cement content was constant ($C = 400$ kg/m³). Cement CEM I 42.5N-HSR/NA was applied in experiments.

The properties of aggregate granular skeleton was changed through the sand content regulation ($S_c = x_4 = 50 \pm 5\%$) and gravel fine fraction 4/8 content ($G_f = x_5 = 60 \pm 20\%$), in the mixture with coarse gravel 8/16 mm. ES-models [1] were presented in the form of initial characteristic Y equation of studied object (in the values of normalised standard variables on the levels from $x_i = -1$ to $x_i = +1$):

$$Y = \begin{array}{l} b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 \\ + b_2 x_2 + b_{22} x_2^2 + b_{23} x_2 x_3 \\ + b_3 x_3 + b_{33} x_3^2 \end{array} \quad (a) \quad \begin{array}{l} + b_{14} x_1 x_4 \\ + b_{15} x_1 x_5 \\ + b_{24} x_2 x_4 \\ + b_{25} x_2 x_5 \\ + b_{34} x_3 x_4 \\ + b_{35} x_3 x_5 \end{array} \quad (c)$$

$$+ b_4 x_4 + b_{44} x_4^2 + b_{45} x_4 x_5 + b_5 x_5 + b_{55} x_5^2 \quad (b)$$

The relations of type [1] describe quantitatively the effect of individual composition factors on the mixture and concrete properties: diameter (D, cm) of concrete mixture flow determined with cone method, flow time T₅₀ of the mixture to D = 50 cm, segregation index SG, air entrainment V_a and strength f_{cm}.

Block (a) in model [1] presents the influence of three composition factors of cement matrix (x_1, x_2, x_3) on studied parameter Y, at con-

Zależności typu [1] opisują ilościowo wpływ poszczególnych czynników składu na właściwości mieszanki i betonu: średnicę (D , cm) rozptywu mieszanki betonowej oznaczanej metodą stożka, czasy rozptywu T_{50} mieszanki do $D = 50$ cm, wskaźniki segregacji SR i napowietżenia V_a , oraz wytrzymałość f_{cm} .

Blok (a) w modelu [1] odzwierciedla wpływ na badany parametr Y trzech czynników składu matrycy cementowej (x_1, x_2, x_3), przy stałym poziomie czynników składu stosu okruszowego (x_4, x_5). Zmianę parametru Y ze zmianą udziału piasku (x_4) i żwiru drobnego (x_5) przedstawia blok (c). Blok (c) przedstawia interakcje czynników.

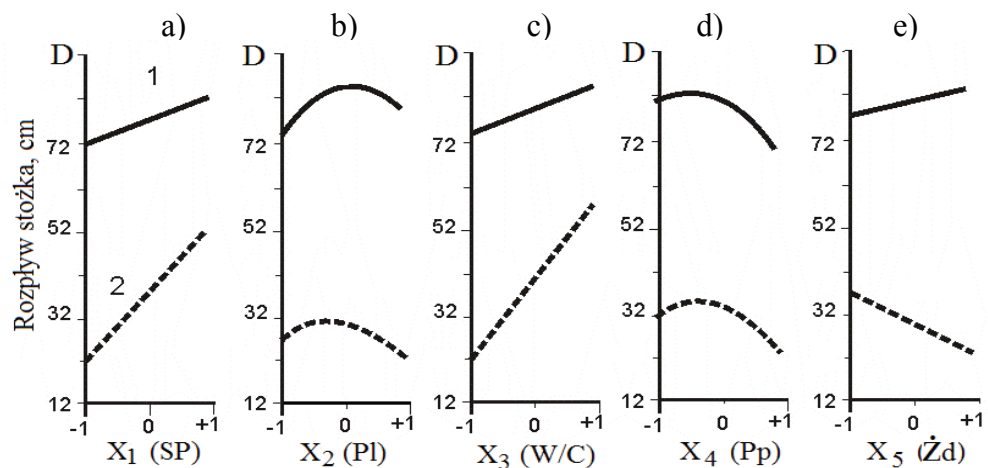
Modele [1] pozwalają prowadzić analizę wpływu wybranego czynnika x_i przy stałych poziomach pozostałych czynników x_j , zapewniających ekstremalne wartości wyjściowej zmiennej Y : maksymalną Y_{max} (współrzędne $x_{i,max}$; $i = 1, \dots, 5$ – strefa „maksimum”) lub minimalną Y_{min} (współrzędne $x_{i,min}$; $i = 1, \dots, 5$ – strefa „minimum”). W ten sposób można porównać wpływ tego czynnika w warunkach „dobrej” i „złej” receptury betonu (5).

Na rysunku 1a-e przedstawiono wpływ na wartość rozptywu D każdego z badanych czynników w strefie „maksimum” i strefie „minimum” wartości tego parametru. Zmiana dodatku superplastyfikatora od $x_1 = 1,0\%$ ($x_1 = -1$) do $1,8\%$ ($x_1 = +1$) powoduje zwiększenie rozptywu mieszanki betonowej (rysunek 1a), podobnie jak wzrost w/c (rysunek 1c). Maksimum $D_{max} = 76$ cm występuje przy zawartości dodatku mineralnego $x_2 = 32,9\%$, czyli $x_2 = 0,29$ (rysunek 1b), a punktu piaskowego na poziomie $x_4 = 48\%$, $x_4 = -0,2$ (rysunek 1d).

Analogiczna analiza modelu T_{50} wykazała wzrost czasu rozptywu ze zwiększeniem ilości piasku i dodatku mineralnego. Dokładność modelu T_{50} , jest mniejsza, gdyż został on zbudowany w oparciu o wyniki 22 doświadczeń z 27 przyjętych w planie eksperymentu (w 5 punktach doświadczalnych nie uzyskano rozptywu $D \geq 50$ cm).

Powiększenie zawartości superplastyfikatora z $x_1 = 1,0\%$ ($x_1 = -1$) do $1,8\%$ ($x_1 = +1$) zwiększa, a dodatku mineralnego, odwrotnie – zmniejsza stopień segregacji, podobnie jak zwiększenie zawartości drobnych frakcji kruszywa. Równocześnie wzrost zawartości piasku i kruszywa drobnego w stosie okruszowym doprowadza do zwiększenia napowietżenia.

Na rysunku 2 pokazano fragment analizy modeli statystycznych. Właściwości matrycy (rysunek 2a) o współrzędnych x_1, x_2 i x_3 , analizuje się w zakresie zmienności czynników stosu okruszowego x_4 i x_5 (rysunek 2b). Z punktu widzenia kształtowania struktury betonu, w tym przypadku, zmiany obejmują modyfikacje matrycy, jamistość i uziarnienie kruszywa, co ma wpływ na właściwości mieszanki betonowej i betonu.



Rys. 1. Analiza wpływu poszczególnych czynników x_i na wielkość rozptywu w strefach D_{max} (krzywa 1) i D_{min} (krzywa 2)

Fig. 1. Analysis of individual factors x_i influence on the flow diameter in zones D_{max} (curve 1) and D_{min} (curve 2). PI = FA, Pp = Sc, Zd = Gf

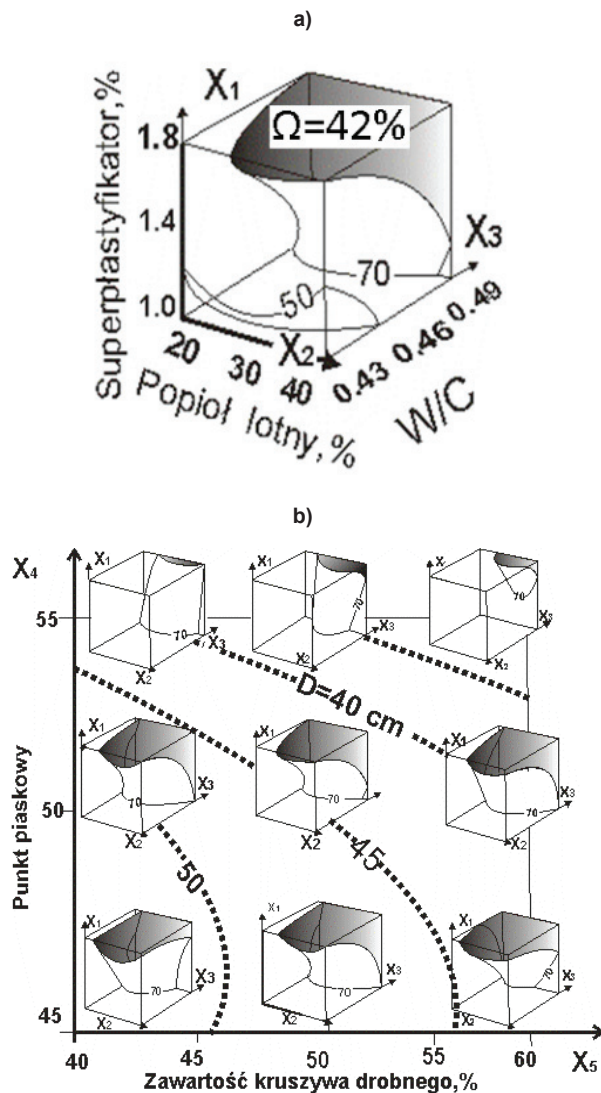
stant level of granular skeleton factors (x_4, x_5). Change of parameter Y with the change of sand share (x_4) and fine gravel (x_5) represents block (c). Block (c) represent the interaction of factors.

Models [1] give the possibility of analysis of the effect of chosen factor x_i at constant levels of remaining factors x_j , assuring extreme values of input variable Y : maximum Y_{max} (coordinates $x_{i,max}$; $i = 1, \dots, 5$ – zone „maximum”) or minimum Y_{min} (coordinates $x_{i,min}$; $i = 1, \dots, 5$ – zone „minimum”). In such a way it is possible to compare the effect of this factor at the conditions of “good” and “bad” concrete recipe (5).

On the figure 1a-e the influence of flow diameter D value of every studied factors in the zones “maximum” and minimum” was shown. The change of superplasticizer addition from $x_1 = 1.0\%$ ($x_1 = -1$) to 1.8% ($x_1 = +1$) is causing the increase of flow diameter of concrete mixture (Fig. 1a), similarly as the increase of w/c ratio (Fig. 1c). Maximum $D_{max} = 76$ cm for the mineral addition $x_2 = 32.9\%$, thus for $x_2 = 0.29$ (Fig. 1b), is occurring, and at the sand content level $x_4 = 48\%$, $x_4 = -0.2$ (Fig. 1d).

The analogous analysis of T_{50} model the increase of flow time with the rise of sand content and mineral addition has shown. The accuracy of model T_{50} is lower, because it is built on the basis of 22 experimental results, from 27 established in the plan of experiment (in 5 experimental points the flow diameter $D \geq 50$ cm was not achieved). The increase of superplasticizer content from $x_1 = 1.0\%$ ($x_1 = -1$) to 1.8% ($x_1 = +1$) increase and mineral addition conversely – decrease the degree of segregation, similarly as the increase of aggregate fine fractions. Simultaneously the rise of sand fine aggregate in the granular skeleton causes the air entrainment increase.

On Fig. 2 fragment of statistical analysis is shown. Matrix properties (Fig. 2a) with coordinates x_1, x_2 and x_3 are analysed in the range of factors variability of granular skeleton x_4 and x_5 (Fig. 2b). From the concrete structure forming point of view, in this case the changes cover the matrix modifications, gaps in granular skeleton



Rys. 2. Wpływ składu matrycy (przy $x_4 = x_5 = 0$) na kształtowanie obszaru $\Omega\{D \geq 70 \text{ cm}\}$ (a) oraz zmiana tego obszaru przy zmianie właściwości stosu okruskowego (b)

Fig. 2. Effect of matrix composition (at $x_4 = x_5 = 0$) on the zone $\Omega\{D \geq 70 \text{ cm}\}$ forming (a) and the zone change at properties of granular skeleton change (b)

Jednym z uogólniających wskaźników, charakteryzujących uniwersalność technologii, jest „objętość” $0 \leq \Omega \leq 100\%$ dopuszczalnego obszaru, względem badanej przestrzeni zmiany czynników. Im bardziej obszar Ω zbliża się do zera, tym bardziej problematycznym staje się wybór dobrego rozwiązania technologicznego (6). W razie zmiany składu (ilościowego i jakościowego), obszar dopuszczalnych rozwiązań $\Omega\{D \geq 70 \text{ cm}\}$, oznaczony na rysunku 2 szarym kolorem, znacznie się zmienia: od $\Omega = 10\%$ przy dużym udziale piasku i żwiru drobnego, do $\Omega = 45\%$ przy $P_p = 45\%$ i $Z_d = 50\%$.

W przypadku zmniejszenia zawartości drobnej frakcji żwiru mniejszej od 45% i punktu piaskowego $P_p < 48\%$ następuje znaczny wzrost wskaźnika segregacji mieszanki. Równocześnie zwiększenie udziału piasku przekraczającego 55% doprowadza do szybkiego pogorszenia jej rozpląwu. Wynika z tego, że spełnienie wymagań stawianych mieszance nawet w przypadku dwóch kryteriów ($SP \leq 1\%$, $D \geq 70 \text{ cm}$), bez optymalizacji uziarnienia kruszywa jest bardzo problematyczne.

and aggregate grading, which has the influence on properties of concrete mixture and concrete itself.

One of the generalizing index, showing the technology stability is the “volume” $0 \leq \Omega \leq 100\%$ of permissible zone, in relation to studied space of factors change. As more Ω zone is approaching zero the more problematic became the choose of good technological solution (6). In the case of composition change (quantitative and qualitative) the zone of permissible solutions $\Omega\{D \geq 70 \text{ cm}\}$, marked on Fig. 2 in grey, is changing significantly: from $\Omega = 10\%$ at high sand and fine gravel content, to $\Omega = 45\%$ at $Sc = 45\%$ and $G_r = 50\%$.

In the case of gravel fraction diminution under 45% and sand content $Sc < 48\%$ the significant increase of mixture segregation index is occurring. Simultaneously the increase of sand share above 55% causes to quick worsening of its flow. It results that the requirements fulfilling by mixture, even in the case of two criterions ($SP \leq 1\%$, $D \geq 70 \text{ cm}$) without aggregate grading optimisation, is very problematic.

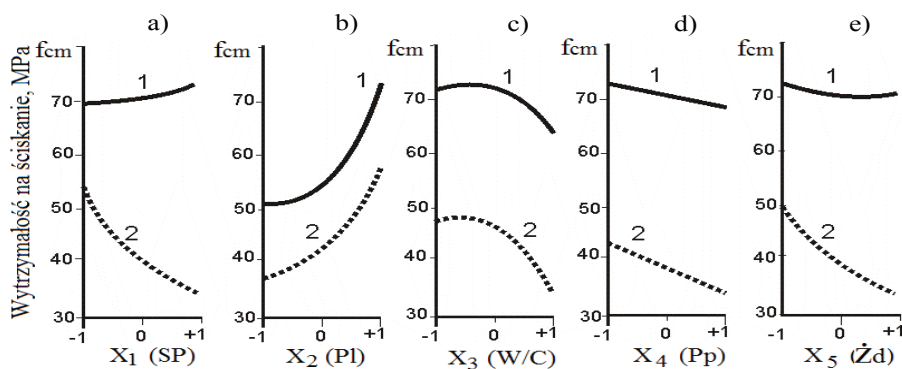
The increase of superplasticizer addition (at constant w/c) from 1.0 to 1.8 causes the insignificant strength increase (Fig. 3a, curve 1). However, in the range of minimum compressive strength f_{cm28} (curve 2) the strength is decreasing 1.7 times. Its decrease can be partially balanced by fly ash addition, which can be deduced from the relation analysis in Fig. 3b (curve 2). Increase of w/c (Fig. 3c), sand content (Fig. 3.d) and fine gravel content (Fig. 3e) causes the diminishing of concrete compressive strength. The conducted analysis shows the necessity of compromise concrete composition establishing in the case of SCC.

3. Concrete composition optimisation with the ES-moduli and Monte Carlo method application

The mixtures composition was established in condition of rigid limits covering the quality parameters of concrete mixture and hardened concrete, imposed by the reinforced construction producers. Concrete mixture should show the flow of $D \geq 70 \text{ cm}$, measured with cone method and minimum time of flow with segregation SG lower than 1% and air entrainment V_a under 6%. Compressive strength (f_{cm}) of concrete after 28 days of hardening should be higher than 60 MPa and after 3 days at least equal 30 MPa.

For concrete composition establishment the method of random scanning of examined properties variability range with the Monte Carlo method was used (6). In first stage, using the models: D , T_{50} , SG , V_a , f_{cm3} , f_{cm28} 10000 accidental points (compositions) of multidimensional cube was generated, to which 27 points of plan was added, which gives 10027 composition alternatives, uniformly distributed in the variability range of five factors $x_1 - x_5$. The scheme of composition establishing is shown on Fig. 4.

On the basis of statistical models and uniformly distributed levels of five normalised factors $x_1 - x_5$ the values of output variables for 10027 compositions were calculated. Generated data (coordinates



Rys. 3. Analiza wpływu poszczególnych czynników X_i na wytrzymałość na ściskanie betonu

Fig. 3. Analysis of individual factors X_i influence on concrete compressive strength

Zwiększanie dodatku superplastyfikatora (przy stałym w/c) od 1,0 do 1,8% powoduje nieznaczny wzrost wytrzymałości (rysunek 3a, krzywa 1). Jednak w zakresie minimalnej wytrzymałości na ściskanie f_{cm28} (krzywa 2) wytrzymałość zmniejsza się 1,7 razy. Jej spadek można częściowo zrównoważyć przez dodatek popiołu lotnego, co można wywnioskować z analizy zależności na rysunku 3b (krzywa 2). Wzrost w/c (rysunek 3c), punktu piaskowego (rysunek 3d) oraz zawartości żwiru drobnego (rysunek 3e) powoduje zmniejszenie wytrzymałości betonu na ściskanie. Przeprowadzona analiza wskazuje na konieczność wyboru kompromisowego składu betonu w rodzaju BSZ.

3. Optymalizacja składu betonu z wykorzystaniem ES-modeli i metody Monte Carlo

Ustalanie składów prowadzono w warunkach sztywnych ograniczeń z uwzględnieniem parametrów jakościowych mieszanki betonowej i stwardniałego betonu, narzuconych przez jednego z producentów konstrukcji żelbetowych. Mieszanka betonowa powinna wykazywać rozptył mierzony metodą stożka $D \geq 70$ cm, minimalny czas rozptyłu przy segregacji SR nie większej niż 1% i napowietrzeniu V_a nieprzekraczającym 6%. Wytrzymałość (f_{cm}) betonu na ściskanie po 28 dniach twardnienia powinna wynosić nie mniej niż 60 MPa, a po 3 dniach co najmniej 30 MPa.

Przy ustalaniu składu betonu stosowano metodę przypadkowego skanowania zakresów zmienności badanych właściwości, z wykorzystaniem metody Monte Carlo (6). W pierwszym etapie, wykorzystując modele D , T_{50} , SR, V_a , f_{cm3} , f_{cm28} , generowano 10000 przypadkowych punktów (składów) wielowymiarowego sześcianu, do którego dodano 27 punktów planu, co daje łącznie 10027 wariantów składu, równomiernie rozłożonych w zakresie zmienności pięciu czynników $x_1 - x_5$. Schemat ustalania składu przedstawiono na rysunku 4.

W oparciu o modele statystyczne i równomiernie rozłożone poziomy pięciu unormowanych czynników $x_1 - x_5$ obliczono wartości zmiennych wyjściowych dla 10027 składów. Generowane dane (współrzędne czynników $x_1 - x_5$ i odpowiadające im zmienne wyjściowe) uszeregowano. Do dalszej analizy wybrano te warianty składów, które spełniały zadane wymagania technologiczne i konstrukcyjne. Pozostałe składki, dla których $D < 70$ cm, SR > 1%,

of factors $x_1 - x_5$ and corresponding to them output variables) were scheduled. For further analysis these compositions alternatives were chosen, which fulfilled the given technological and constructional requirements. Remaining composition, for which $D < 70$ cm, SG > 1%, $V_a > 6\%$, $T_{50} > 5$ s, $f_{cm3} < 30$ MPa, $f_{cm28} < 60$ MPa were rejected. The levels of normalised variables factors $x_1 - x_5$ and criterion values of quality in the consecutive iteration were shown on Figs. 5 a-e and 6 a-f.

After first iteration the variability intervals became significantly lower, in comparison with outputs data. Remained 97 variants, which fulfilled all given criterions. Taking

into account the superplasticizer price, its content in the mixture was limited to $SP \leq 1.5\%$. After this limitation the variants number decreased to 6.

For the established in the first stage calculation the lower intervals x_i^{1-2} (Fig. 5) in the next iteration 2-0 the intervals were enlarged to the value $x_i^{2-0} \pm \Delta x_i$. The new intervals values were established for each factor separately, taking into account the accuracies of components weighing, the changed level influence on concrete properties etc.

In this new ranges ($x_i^{2-0} \pm \Delta x_i$) for each factor the composition variants were generated again. To the new 10000 variants generated in smaller variability region x_i , 6 results from the first repetition was added ($N_{2-0} = 10006$).

In comparison with previous iteration 1-2 the new iteration with lower variability factors range $x_i^{2-0} \pm \Delta x_i$ multidimensional network with cell of smaller dimension is determined. This operation increase the probability of sought compositions establishing in studied variability range and more precisely defines the searched results.

Elimination in stage 2-1 "non satisfying" compositions with parameters worse than giving is resulting in selection of 524 new variants with required properties. Further iterations did not resulted in higher changes of both: factors levels and concrete mixture and hardened concrete properties. That is why in final stage (2-2) the SP additions was lowered to 1.4%. This action give the possibility to choose the most economical composition. Remained after the elimination three composition was very similar: cement - 400kg/m³, water - 187÷190 dm³/m³, sand - 741÷744 kg/m³, gravel 4/8 - 453÷487 kg/m³, fly ash - 156÷160 kg/m³, SP - 5.9÷6.1 dm³/m³.

The searched compositions had the flow diameter in the range $D=70-72$ and flow time not exceeding 2 s, air entrainment below 6.0% and concrete compressive strength after 3 days on the level of 30 MPa and after 28 days of 60 MPa. The compositions verification was executed according to EFNARC (3).

Because of the value of segregation index the class SG2 was obtained. The viscosity class VS2/VF2 was determined on the basis of flow time T_{50} and the outflow of mixture from V-Funnel

$V_a > 6\%$, $T_{50} > 5$ s, $f_{cm3} < 30$ MPa, $f_{cm28} < 60$ MPa, odrzucono.

Poziomych zmiennych unormowanych czynników $x_1 - x_5$ i wartości kryteriów jakości w kolejnej iteracji pokazano na rysunkach 5 a-e oraz 6 a-f.

Po pierwszej iteracji przedziały zmienności czynników uległy znacznemu zmniejszeniu, w porównaniu z wyjściowymi. Pozostało 97 wariantów, które odpowiadały wszystkim wyznaczonym kryteriom. Ze względu na cenę superplastyfikatora jego zawartość w mieszance ograniczono do $SP \leq 1,5\%$. Po tym ograniczeniu liczba wariantów zmniejszyła się do 6.

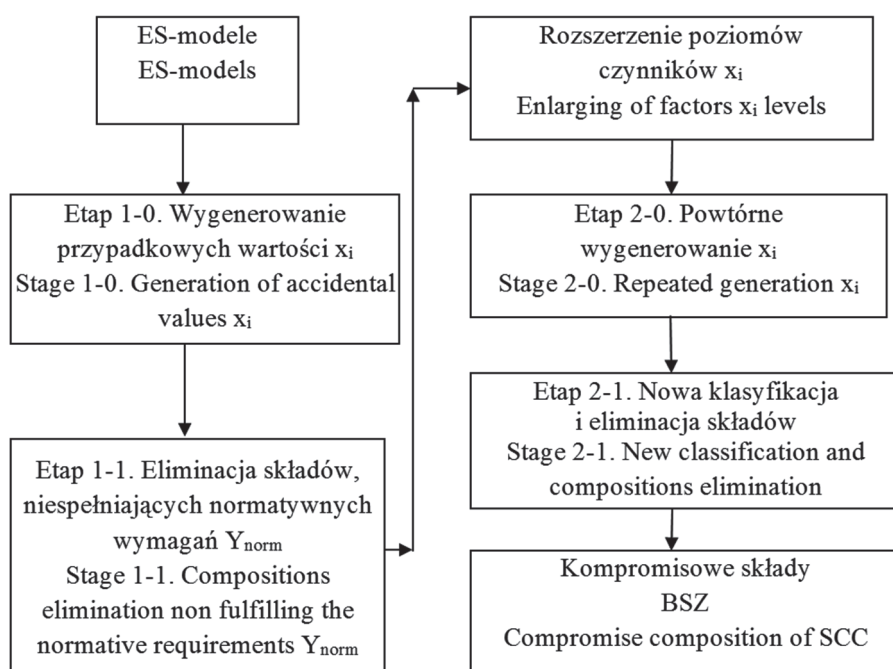
Do wyznaczonych po pierwszym etapie obliczeń zmniejszonych przedziałów x_i^{1-2} (rysunek 5) w następnej iteracji 2-0 rozszerzono przedziały do wartości $x_i^{2-0} \pm \Delta x_i$. Wartości nowych przedziałów wyznaczono dla każdego czynnika osobno z uwzględnieniem dokładności ważenia składników, wpływu zmian poziomu na właściwości betonu itp.

W tych nowych granicach ($x_i^{2-0} \pm \Delta x_i$) dla każdego czynnika ponownie wygenerowano warianty składów. Do nowych 10000 wariantów, wygenerowanych w mniejszym obszarze zmienności x_i , dodano 6 wyników z pierwszego powtarzania ($N_{2-0}=10006$).

W porównaniu z poprzednią iteracją 1-2 nowa iteracja, o mniejszym zakresie zmienności czynników $x_i^{2-0} \pm \Delta x_i$, niejako narzuca wielowymiarową siatkę z mniejszym rozmiarem komórek. Ta operacja zwiększa prawdopodobieństwo znalezienia szukanych składów w badanym obszarze zmienności i dokładniej definiuje wyniki wyszukiwania.

Eliminacja na etapie 2-1 „niezadowolających” składów z parametrami gorszymi od zadanych, doprowadza do wydzielenia nowych 524 wariantów z wymaganymi właściwościami. Dalsze iteracje nie pociągnęły za sobą większych zmian zarówno poziomów czynników, jak i właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Dlatego w końcowym etapie (2-2) dodatek SP ponownie zmniejszono do 1,4%. Ta operacja umożliwiła wybór najbardziej ekonomicznych składów. Pozostałe po eliminacji 3 składy były bardzo zbliżone: cement – 400 kg/m^3 , woda – $187 \div 190 \text{ dm}^3/\text{m}^3$, piasek – $741 \div 744 \text{ kg/m}^3$, żwir 4/8 – $453 \div 487 \text{ kg/m}^3$, popiół – $156 \div 160 \text{ kg/m}^3$, SP – $5,9 \div 6,1 \text{ dm}^3/\text{m}^3$.

Opracowane składy zapewniały rozplyw mieszanki betonowej w granicach $D = 70 \div 72$ cm i czasem rozplywu nie większym niż 2 sekundy, napowietrzeniem nie większym niż 6,0% oraz wytrzymałością betonu na ściskanie po 3 dniach na poziomie 30 MPa, a po 28 dniach – 60 MPa.



Rys. 4. Schemat ustalania składów BSZ

Fig. 4. Scheme of SCC composition establishment

($T_v = 12$ s). According to the test results of L-Box determining of the mixture ability to self-levelling in reinforced formwork, the concrete mixture fall with PA2 class, because the inclination from horizontal line is lower than 0.2.

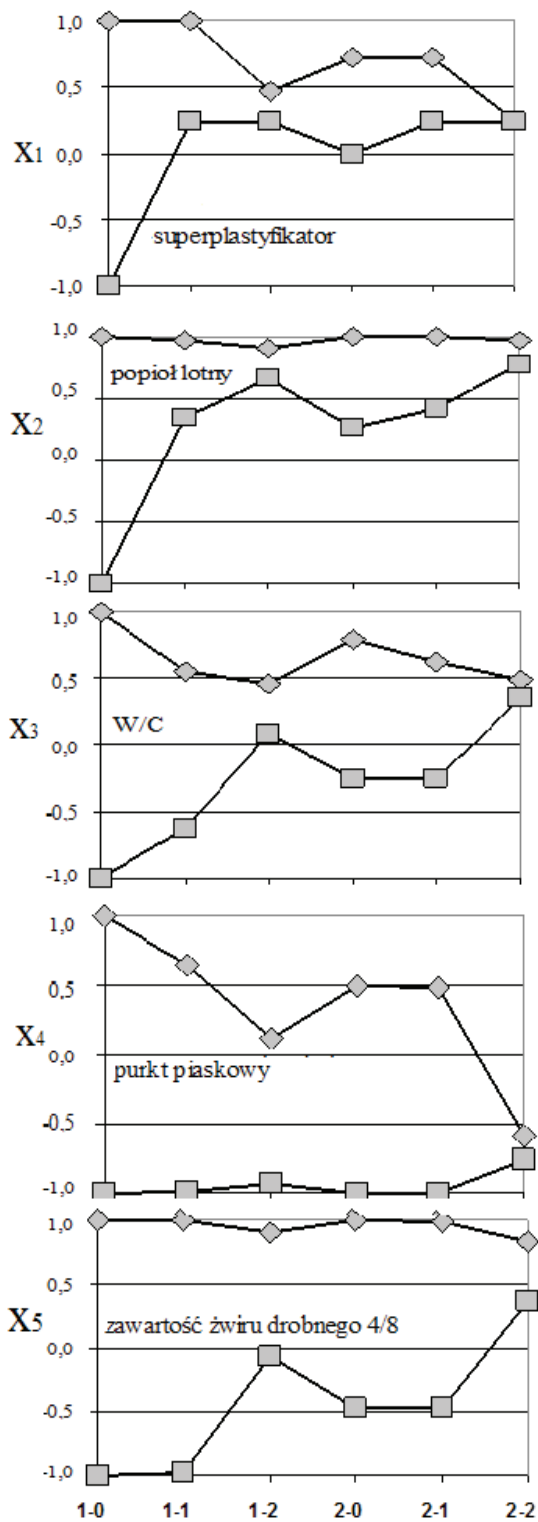
4. The condition of mixture self-compacting analysing in modelling of superplasticizer and mineral addition influence

The study of admixtures effect on the self-compacting concrete mixtures properties covered the segregation evaluation, air entrainment, flow time, out-flow time of concrete mix (V-Funnel test) and the ability to self-leveling (L-Box test). As the inputs the compositions of concrete mixture variants were adopted, chosen in optimisation stage with Monte Carlo method. Their properties fulfilled the required of SCC mixtures.

The studies were realised on the basis of experiment plan of 3^2 (6), in which the superplasticizer content was changed in the range $SP = X_1 = 1.4 \pm 0.4\%$ and fly ash $FA = X_2 = 30 \pm 10\%$. The concrete mixtures had similar flow diameter equal $D = 72 \pm 2$ cm [consistency class – SF2 according to classification given in (3)]. Cement content was constant, equal $C = 400 \text{ kg/m}^3$.

In Table 1 the results of experimental concrete mixtures evaluation, with the help of methods given in Guidelines (3), are shown. The analysis is showing that the compositions no 1 and no 4 do not fulfil totally the self-levelling criterion. In this case they can behave as “quasi-self-compacting”, for which a limited vibration can be applied (2).

In order to proper describing the admixture and fly ash effect on concrete properties the regression function is adopted in the form:

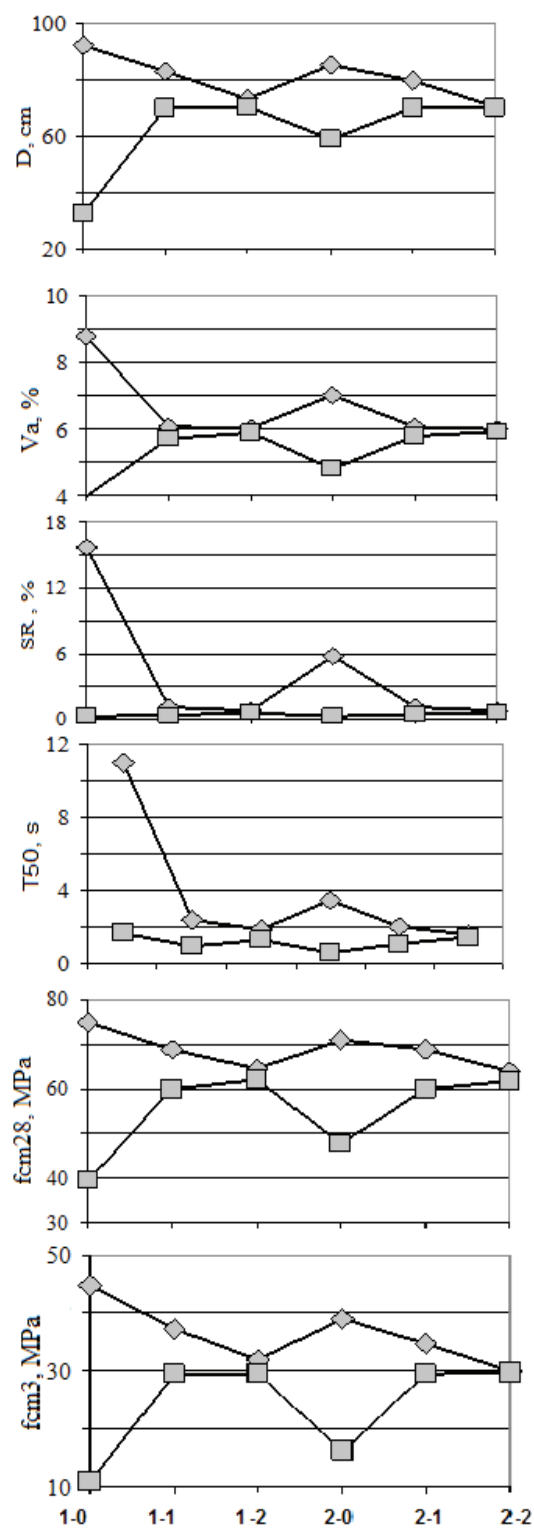


Rys. 5. Zmiana poziomu czynników składu w procesie iteracji

Fig. 5. The change of composition factors level in iteration process

Weryfikację składów przeprowadzono zgodnie z metodą EFNARC (3).

Ze względu na wartość wskaźnika segregacji uzyskano klasę SR2. Klasę lepkości VS2/VF2 określono na podstawie badania czasu rozplywu T_{50} i wypływu mieszanki z lejki „V-funnel” ($T_v = 12$ s). Zgodnie z wynikami testu „L-Box”, określającego zdolność mieszanki do samowyrównywania w uzbrojonej formie, mieszan-



Rys.6. Zmiana poziomów właściwości betonu w procesie iteracji

Fig. 6. The change of concrete properties levels in iteration process

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{112}x_1^2x_2 + b_{122}x_1x_2^2, \quad [2]$$

where: x_1, x_2 are the standard variables of admixture and fly ash content.

Model [2] describes the individual factors x_i influence and also their interactions, taking account of possible synergism with element $b_{ij}x_i^2x_j$.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH
CONCRETE MIXTURES PROPERTIES

Nr No	Domieszka i dodatek Admixture and addition, SP FA %		Ocena segregacji Segregation evaluation SG% class		Ocena konsystencji Consistency evaluation, T ₅₀ , s class		Ocena wypływu Outflow evaluation, T _v , s class		Ocena samopoziomowania, Self levelling evaluation H ₂ /H ₁ class	
	SP	PI	SR,%	Klasa	T ₅₀ ,s	Klasa	T _v , s	Klasa	H ₂ /H ₁	Klasa
1	1,0	20	17	SR2	2,5	VS2	7,0	VF1	0,65	-
2	1,0	30	14	SR2	4,0	VS1	12,0	VF2	0,91	PA2
3	1,0	40	12	SR2	4,0	VS1	24,0	VF2	1,0	PA2
4	1,4	20	11	SR2	2,5	VS2	10,0	VF2	0,76	-
5	1,4	30	5	SR2	6,0	VS1	15,0	VF2	0,83	PA2
6	1,4	40	4	SR1	10,0	VS1	50,0	VF2	0,91	PA2
7	1,8	20	24	-	2,0	VS2	16,0	VF2	0,82	PA2
8	1,8	30	19	SR2	4,0	VS1	11,0	VF2	0,91	PA2
9	1,8	40	17	SR2	5,0	VS1	30,0	VF2	0,94	PA2

ka betonowa mieści się w klasie PA2, ponieważ ma odchylenie w stosunku do linii poziomej mniejsze od 0,2.

4. Analiza warunków samozagęszczania się mieszanki przy modelowaniu wpływu superplastyfikatora i dodatku mineralnego

Badanie wpływu domieszek na właściwości samozagęszczających się mieszanek betonowych obejmowały ocenę segregacji, napowietrzania, czasu rozplywu, wypływu mieszanki betonowej („V-Funnel Test”) oraz zdolności do samopoziomowania („L-Box Test”). Jako wyjściowe przyjęto warianty składów mieszanek betonowych wybranych na etapie optymalizacji metodą Monte Carlo. Ich właściwości odpowiadały wymaganiom stawianym mieszankom BSZ.

Badania wykonano wykorzystując plan eksperymentu rodzaju 3² (6), w którym zmieniały się zawartości superplastyfikatora w zakresie SP = X₁ = 1,4±0,4% i popiołu lotnego PI = X₂ = 30±10%. Mieszanki betonowe miały zbliżoną średnicą rozplywu wynoszącą D = 72±2 cm [klasa konsystencji – SF2 zgodnie z klasyfikacją podaną w (3)]. Ilość cementu była stała i wynosiła C=400 kg/m³.

W tablicy 1 przedstawiono wyniki doświadczalnej oceny mieszanek betonowych z zastosowaniem metod podanych w wytycznych (3). Analiza pokazuje, że skład nr 1 i nr 4 nie spełniają w pełnym stopniu kryterium samopoziomowania. W tym przypadku mogą one zachowywać się jako „quasi-samozagęszczalne”, w przypadku których dopuszcza się zastosowanie ograniczonej wibracji (2).

W celu właściwego opisanie wpływu domieszki i popiołu lotnego na właściwości betonu przyjęto funkcję regresji w postaci:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{112}x_1^2x_2 + b_{122}x_1x_2^2, [2]$$

gdzie: x₁, x₂ są zmiennymi standardowymi udziału domieszki i popiołu.

Time T₅₀ (in seconds) of concrete mixture flow to the diameter of 50 cm is characterising the rate of formwork filling by the mixture. The modifiers effect on index T₅₀ (in seconds) is describing model [3] with error equal ε_{ik} = 1 s:

$$T_{50} = 6.4 + 3.8x_2 - 2.6x_1^2 - 0.3x_2^2 + 0.4x_1x_2 - 2.6x_1^2x_2 \quad [3]$$

The analysis of isolines (Fig. 7a) fulfilling the formula [3] shows that the increase of fly ash content causes proportional increase of concrete mixture flow, which is probably linked with the increase of plastic viscosity. However, the increase of superplasticizer addition, causing this time shortening should be in the range SP=1.3÷1.5%.

The admixture and fly ash effect on outflow time of concrete mix from V-Funnel describes model [4] with the error equal ε_{ik}=1.8 s (Fig. 7b):

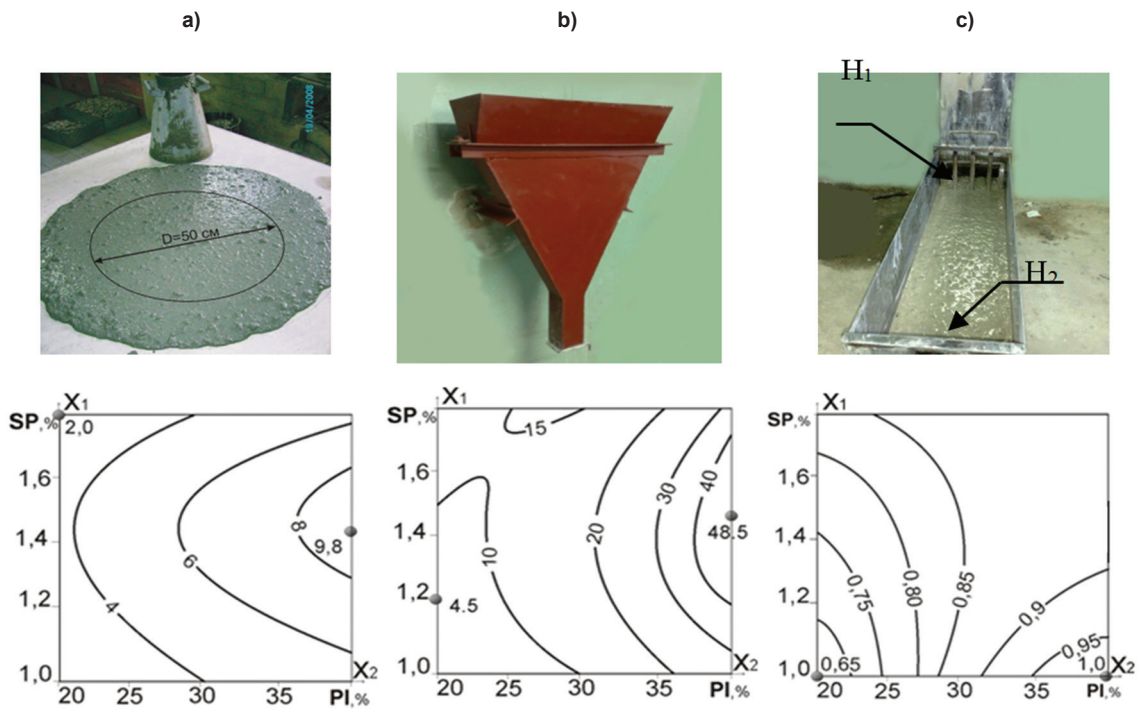
$$T_v = 18,2 + 20,0x_2 - 8,3x_1^2 + 10,2x_2^2 - 12,3x_1^2x_2 + 3,8x_1x_2^2 \quad [4]$$

Model [4] analysis (Fig. 7b) is showing that the increase of fly ash content can cause the lengthening of time T_v outflow, even ten times (from 4.5 to 48.5 s). Achievement of minimum time T_v = 4.55 in the point with coordinates {x₁ = -0.48, x₂ = -1} corresponding to SP = 1.2% and FA = 20% testifies in this case of possible compatibility of both modifiers.

The effect of admixture and fly ash on parameter H₂/H₁, i.e. ability of concrete mixture to self-levelling is presented by formula [5], with the experimental error ε_{ik} = 002:

$$H_2/H_1 = 0.86 + 0.04x_1^2 + 0.08x_2 - 0.04x_2^2 - 0.06x_1x_2 + 0.04x_1^2x_2 + 0.03x_1x_2^2 \quad [5]$$

The orientation of isoline on Fig. 7c shows, that the increase of fly ash content arguments the concrete mixture ability to self-levelling. The superplasticizer influence on H₂/H₁ index is the most emphasized in the zone of low contents of fly ash.



Rys. 7. Wpływ domieszki i popiołu lotnego na właściwości mieszanek: czas rozptywu T_{50} (a), czas wypływu T_v (b) z lejka V-funnel, wskaźnik samopoziomowania H_2/H_1 (c)

Fig. 7. Effect of the admixture and fly ash on mixtures properties: time of flow T_{50} (a), time of outflow T_v (b) from V-funnel, self-leveling index H_2/H_1 (c)

Model [2] opisuje indywidualny wpływ czynników x_i , jak również ich interakcje z uwzględnieniem możliwego synergizmu elementem $b_{ij}x_i^2x_j$. Zostały one uwzględnione w analizie po odrzuceniu mało istotnych współczynników przy założonym poziomie ryzyka $\alpha=0,2$ i błędzie doświadczalnym ϵ_{ik} .

Czas T_{50} (w sekundach) rozptywu mieszanki betonowej do średnicy 50 cm charakteryzuje prędkość wypełnienia deskowania mieszanką. Wpływ modyfikatorów na wskaźnik T_{50} (w sekundach) opisuje model [3] z błędem równym $\epsilon_{ik} = 1$ s:

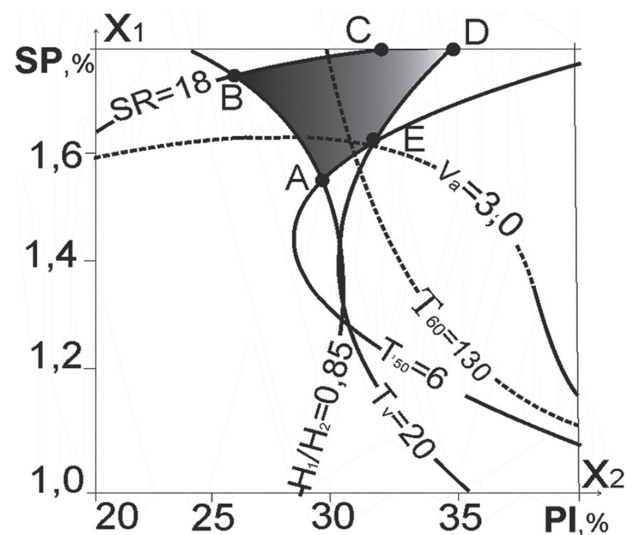
$$T_{50} = 6.4 + 3.8x_2 - 2.6x_1^2 - 0.3x_2^2 + 0.4x_1x_2 - 2.6x_1^2x_2 \quad [3]$$

Analiza izolinii (rysunek 7a), odpowiadających zależności [3] pokazuje, że zwiększenie zawartości popiołu lotnego powoduje proporcjonalne zwiększenie czasu rozptywu mieszanki betonowej, co prawdopodobnie związane jest ze zwiększeniem jej lepkości plastycznej. Natomiast zwiększenie dodatku superplastyfikatora powodujące skrócenie tego czasu powinno mieścić się w przedziale: $SP = 1,3 \div 1,5\%$.

Wpływ domieszki i popiołu lotnego na czas wypływu mieszanki betonowej z lejka V-Funnel opisuje model [4] z błędem równym $\epsilon_{ik}=1,8$ s (rysunek 7b):

$$T_v = 18,2 + 20,0x_2 - 8,3x_1^2 + 10,2x_2^2 - 12,3x_1^2x_2 + 3,8x_1x_2^2 \quad [4]$$

Analiza modelu [4] (rysunek 7b) wykazuje, że zwiększenie zawartości popiołu lotnego może prowadzić do wydłużenia czasu T_v wypływu nawet dziesięciokrotnie (z 4,5 do 48,5 s). Osiągnięcie minimalnego czasu $T_v = 4,5$ s w punkcie o współrzędnych $\{x_1 = -0,48, x_2 = -1\}$ odpowiadających $SP = 1,2\%$ i $PI = 20\%$ świad-



Rys.8. Wyznaczanie zakresu mieszanek samozagęszczających się

Fig. 8. The range of self-compacting mixtures determination

Searching of optimum solutions was investigated with the help of bifactors diagrams by isolines of quality indexes values coupling.

The optimum zone {A, B, C, D, E} of admixture and fly ash (Fig. 8) was determined, in which the requirements for classes SF2/VS1/VF2/PA2 of self-compacting mixtures are fulfilled, by simultaneous achieving higher values of quality indexes for each class. Simultaneously the self-compacting mixtures retain these properties, among other flow diameter exceeding 60 cm during the period $T_{60} = 120$ to 140 min, with air entrainment $V_a = 3$ to 4%. Good pro-

czy o możliwej zgodności obu modyfikatorów w tym przypadku.

Wpływ domieszki i popiołu lotnego na parametr H_2/H_1 – zdolności mieszanki betonowej do samopoziomowania opisuje zależność [5] z błędem eksperymentu $\epsilon_{ik} = 0,02$:

$$H_2/H_1 = 0.86 + 0.04x_1^2 + 0.08x_2 - 0.04x_2^2 - 0.06x_1x_2 + 0.04x_1^2x_2 + 0.03x_1x_2^2 \quad [5]$$

Przebieg izol linii na rysunku 7c pokazuje, że wzrost zawartości popiołu lotnego zwiększa zdolność mieszanki betonowej do „samopoziomowania”. Wpływ superplastyfikatora na wskaźnik H_2/H_1 jest najbardziej widoczny w strefie małych zawartości popiołu lotnego.

Poszukiwanie optymalnych rozwiązań przeprowadzono z wykorzystaniem dwuczynnikowych diagramów przez połączenie izol linii wartości wskaźników jakości.

Wyznaczono optymalny obszar {A, B, C, D, E} udziałów domieszki i popiołu lotnego (rysunek 8), w którym spełnione są wymagania dla klas SF2/VS1/VF2/PA2 mieszanek samozagęszczających się, przy jednoczesnym osiągnięciu wyższych wartości wskaźników jakości dla każdej z klas. Równocześnie mieszanki samozagęszczające się zachowują te właściwości, między innymi rozprzyle nie mniejszy niż 60 cm przez okres $T_{60} = 120 \dots 140$ min, przy napowietrzeniu $V_a = 3 \dots 4\%$. Dobre właściwości zostały osiągnięte przy dodawaniu superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksylianowych SP = 1,6÷1,8% i dodatku mikrowypełniacza w postaci popiołu lotnego PI = 23÷36%.

5. Podsumowanie

Przedstawiono możliwości opracowania składów betonów samozagęszczających się z wykorzystaniem modelowania statystycznego i metody Monte Carlo. Na podstawie otrzymanych modeli wygenerowano co najmniej 10000 składów przy losowej zmianie poziomów badanych czynników. W trakcie iteracji odrzucono warianty składów nie spełniające wymagań kryteriów jakości. Znalezione udziały i domieszki popiołu lotnego spełniające wymagania klasy SF2/VS1/VF2/PA2 mieszanek samozagęszczających się, przy równoczesnym osiągnięciu bardzo dobrych właściwości.

Uwaga końcowa: w następnym artykule zostaną podane optymalne składki BSZ i potwierdzone doświadczalnie ich właściwości.

properties were achieved by polycarboxylane superplasticizer SP = 1.6-1.8 and microfiller addition FA = 23-36%.

5. Summarising

The possibilities of SCC compositions determination using statistical modelling and Monte Carlo method were presented. On the basis of obtained models at least 10000 composition were generated, by random change of the levels of factors studied. By iteration the composition variants were eliminated, which did not fulfilled quality criterious. The share of admixture and fly ash was found for SCC mixtures, which fulfilled the requirements of class SF2/US1/UF2/PA2 by simultaneous very good properties achieving.

Final remark: in the next paper the optimum compositions of SCC with experimental proving of their properties will be presented.

Literatura / References

1. P. C. Aitcin, High- Performance Concrete. E & FN SPON, 1998.
2. J. Szwabowski, J. Gołaszewski, Technologia betonu samozagęszczalnego. Polski Cement, 2010.
3. The European Guidelines for Self Compacting Concrete, EFNARC, Specification, Production and Use, 2005.
4. С. В. Коваль, М. Циак, М. Ситарски, Д. Поляков, Пути создания самоуплотняющихся бетонов // Сб. науч. тр. Научно-исследовательского института строительных конструкций. Киев: НИИСК, 2009. № 72. С.232-238.
5. С. В. Коваль, Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов. - Одесса: Астропринт, 2012.
6. V. A. Voznesensky, T. V. Lyashenko, Experimental-statistical modelling in computational materials science. Odessa: Astroprint, 1998.