

Analiza statystyczna właściwości mechanicznych mieszank trójskładnikowych betonów o dużej wytrzymałości

Statistical analysis on mechanical behaviour of ternary blended high strength concrete

J. Robinson^{1,*}, V.G. Srisanthi²

¹ Department of Civil Engineering, Akshaya College of Engineering and Technology, Coimbatore, India

² Department of Civil Engineering, Coimbatore Institute of Technology, Coimbatore, India

*Corresponding author: J. Robinson, e-mail:sonj.kalai@gmail.com

Streszczenie

Rosnące zapotrzebowanie na beton o dużej wytrzymałości [BDW] w budownictwie zwiększa zużycie cementu, co powoduje problemy środowiskowe. Ostatnie badania wykazują, że wykorzystanie materiałów cementowych w betonie może skutecznie zmniejszyć objętość cementu. W niniejszej pracy przygotowano trójskładnikowe mieszanki cementu, krzemionki i popiołu lotnego w celu uzyskania BDW. W tym przypadku cement został częściowo zastąpiony odpowiednio: pyłem krzemionkowym – 0, 2,5, 5, 7,5 i 10% oraz popiołem lotnym – 0, 5, 10 i 15%. W celu określenia kompatybilności zaczynu cementowego z super-plastyfikatorem opartym na eterze polikarboksylanowym [PCE], przeprowadzono badanie metodą mini stożka opadowego. Obliczono gęstość ziaren kruszyw w celu zmniejszenia porów i poprawy rozmieszczenia cząstek w BDW. Przeprowadzono badania doświadczalne i uzyskano ostateczną wytrzymałość na ściskanie 71,55 MPa, po 28 dniach twardnienia. Badania mikrostruktury przeprowadzono przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego i spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii, aby poznać podstawowy mechanizm i udział składników chemicznych wpływających na zmianę właściwości mieszanki w różnych etapach. Przeprowadzono analizę regresji wielokrotnej [ARW] w celu symulacji projektu mieszanki, aby wspomóc przewidywanie wytrzymałości na ściskanie betonu o dużej wytrzymałości.

Słowa kluczowe: pył krzemionkowy, popiół lotny, badanie metodą mini stożka opadowego, gęstość rozmieszczenie ziaren, analiza mikrostruktury

Summary

The growing demand for high strength concrete [HSC] in the construction industry increases the usage of cement, resulting in environmental issues. Recent studies are showing that the utilization of cementitious materials in concrete can effectively reduce the volume of cement. In the present study, ternary blended combinations were prepared using cement, silica fume, and fly ash to attain the HSC. Here, cement was partially replaced by silica fume [2.5, 5, 7.5, and 10%] and fly ash [5, 10, and 15%], respectively. Mini slump cone test was conducted to identify the compatibility of cement paste with polycarboxylate ether [PCE] based superplasticizer. The packing density of aggregates was calculated to reduce the voids and improve the particle distribution in HSC. An experimental investigation was carried out, and the ultimate compressive strength was obtained as 71.55 MPa at 28 days of curing. Multi linear regression analysis was conducted to simulate the mix design for aiding the prediction of compressive strength of the HSC.

Keywords: high strength concrete, silica fume, fly ash, mini slump test, placing density, multi linear regression analysis

1. Wprowadzenie

Cement jest uważany za jeden z najbardziej szkodliwych ekologicznie produktów, stosowanych w budownictwie. Zagrożenia związane z produkcją cementu są różne, m.in. emisja gazów cieplarnianych, problemy z utylizacją podczas rozbiórki, zużycie zasobów naturalnych. Z tego powodu badacze aktywnie poszukują, alternatywnych materiałów budowlanych. Pomimo, że całkowite zastąpienie cementu jest ekonomicznie i technicznie nieopłacalne, inne dodatki mineralne – uzupełniające materiały cementowe, a mianowicie

1. Introduction

Cement is considered one of the most environmentally harmful products, used in the construction industry. The threats of cement production are various, such as greenhouse gases, disposal problems during demolition, and consumption of natural resources. Therefore, researchers are actively looking for alternative building materials. Although a complete replacement of cement is not feasible, other compounds, such as supplementary cementitious materials [SCMs] such as fly ash, granulated blastfurnace slag

popiół lotny, mielony granulowany żużel wielkopiecowy – GŻW, metakaolin i pył krzemionkowy, i ich wpływ na właściwości cementu są szczegółowo badane. Oczekuje się, że ograniczenia betonów z mieszanek dwuskładnikowych zostaną zrównoważone przez trójskładnikowe mieszanki cementu z dwoma z tych materiałów cementowych w optymalnych zawartościach.

W niniejszej pracy badano wpływ dodatków mineralnych na właściwości mechaniczne betonu klasy M65. Oprócz dodatków mineralnych – popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego, badano również wpływ domieszki upłychniącej do betonu, PCE - Sika Plast 5202 NS, na właściwości trójskładnikowych mieszanek BDW. Materiały użyte w badaniach oznaczono ich właściwości fizyczne i skład chemiczny. Ponadto analizowano inne czynniki, takie jak gęstość rozmieszczenia ziaren kruszywa oraz zachowanie się zaczynów cementowych podczas płynięcia. Aby uzyskać beton o pożądanej wytrzymałości i właściwości, uważane jest za konieczne dokładne poznanie materiałów i ich właściwości fizycznych. Oprócz poszczególnych właściwości składników, dla uzyskania optymalnego składu mieszanki konieczna jest również opłacałość ich wykorzystania (1). Optymalną proporcję mieszanki dla BDW uzyskano na podstawie wytycznych normy IS 10262 (2019) (2). Urabialność mieszanki w stanie świeżym badano metodą stożka opadowego. W celu oceny mieszanek określono właściwości stwardniałego betonu, a mianowicie wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz wytrzymałość na zginanie. Następnie przeprowadzono analizę mikrostrukturalną, aby poznać, co ma wpływ na te właściwości. Ponadto podjęto analizę regresji w celu przewidywania wytrzymałości BDW w korelacji z wartościami doświadczalnymi.

W zależności od stopnia zastąpienia kruszywa drobnego piaskiem kruszonym, odpowiednio zmienia się również wytrzymałość na ściskanie (3). Oprócz składników i proporcji mieszanki, rozmieszczenie ziaren kruszywa w różnych warunkach fizycznych – mokre i suche, wpływa ogólnie na wytrzymałość betonu (4). Li i in. (5) zauważali, że rozmieszczenie ziaren kruszywa na mokro jest zawsze lepsze niż na sucho. Oprócz wszystkich wymienionych właściwości, duże znaczenie dla wytrzymałości i trwałości betonu ma również rodzaj kruszywa (6).

Badania optymalnej dawki superplastyfikatora – punkt nasycenia przy użyciu różnych spojów [cement portlandzki – CEM, cement portlandzki pucolanowy – CPP, cement portlandzki żużlowy – CPŻ] wobec różnych superplastyfikatorów [SP], sulfonowany kondensat naftalenowo-formaldehydowy – SNF i polikaboksyterty – PCE, wykazały, że CPŻ wymagał większego dodatku domieszki upłychniącej w punkcie nasycenia w porównaniu z pozostałymi dwoma cementami, co przypisano wielkości i kształtu ziaren cementu. Podobnie, gdy przeprowadzono badania optymalnego dodatku różnych SP, optymalny dodatek PCE wydaje się być mniejszy niż SNF, co przypisuje się strukturze molekularnej łańcuchów polimerowych PCE (7). Właściwości reologiczne zaczynów cementowych można określić za pomocą empirycznych metod badawczych, takich jak metoda lejka Marsh'a i mini stożka opadowego. Korelację można uzyskać stosując niektóre modele reologiczne, tj. Binghama

[GBS], metakaolin and silica fume's contribution to the cementitious properties, are extensively studied. The shortfalls of these binary blended concretes are expected to be overcome by ternary blended cement mixes with two of these cementitious materials at optimal content.

In this study, the influence of SCMs and their mechanical behaviour with M65 grade of concrete was exclusively investigated. Besides SCMs – fly ash and silica fume, the action of chemical high range water reducing admixture [PCE - Sika Plast 5202 NS] in the ternary blended HSC mixes was also under studies. The materials used in the research were studied for their physical properties and chemical composition. In addition, other factors such as the placing density of aggregates and the flow behaviour of the cement pastes were analysed. To achieve the concrete with desired strength and properties, a careful examination of the materials and their physical qualities are deemed necessary. Apart from the particular properties of the ingredients, the feasibility of ingredients is also necessary to achieve an optimum mixture proportion (1). An optimum mixture proportion for high strength concrete HSC was obtained basing on the guidelines from IS 10262 (2019) (2). The workability of the mix in the fresh state was studied using the slump test. The hardened concrete, its properties such as compressive strength, split tensile strength, and modulus of rupture were determined to evaluate the mixes. Then a microstructural analysis was carried out with EDAX and SEM to find what caused these properties. In addition, a regression analysis was undertaken to predict the strength of HSC in correlation with the experimental values.

Depending on the replacement level of fine aggregates with M-Sand [Manufactured Sand] the compressive strength also varies respectively (3). Apart from the ingredients and mix proportions, the distribution of the aggregates in different physical conditions [wet and dry] generally affects the strength of concrete (4). Li et al. (5) observed that the wet distribution of the aggregates is always better than at dry condition. Apart from all the properties mentioned above, the kind of aggregates also plays a vital role in deciding the strength and durability of the concrete (6).

The studies of the optimum saturation dosage of superplasticizer using various binders [Ordinary Portland Cement - OPC, Portland Pozzolana Cement - PPC, and Portland Slag Cement - PSC] against various superplasticizers [SP] [sulfonated naphthalene-formaldehyde condensate - SNF and polycaboxyethers - PCE] showed, that PSC had a need of the higher saturation dosage compared with the other two binders. This was attributed to the grain size and shape of the binder particles. Similarly, when the optimum dosage studies were carried out with different SPs, the optimum dosage of PCE seems to be lower than that of SNF, which is attributed to the molecular structure of the polymeric chains of the PCE (7). The rheological properties of cement pastes can be determined using empirical test methods such as Marsh cone and mini-slump methods. A correlation can be obtained using some rheological models, i.e., Bingham and Herschel Bulkley to characterize the rheology of the cement paste using various cementitious materials (8).

i Herschela-Bulkleya, do opisu reologii zaczynu cementowego z dodatkami mineralnymi (8).

Wpływ popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego badano osobno, aby zrozumieć ich oddziaływanie na przepuszczalność i właściwości mechaniczne betonu, o dużej wytrzymałości (9). Po dokładnych badaniach stwierdzono, że dynamika przyrostu wytrzymałości betonu z dodatkiem pyłu krzemionkowego i popiołu lotnego, jako mieszanki trójskładnikowej jest lepsza niż w przypadku zwykłego betonu (10). Przyczyną lepszej wytrzymałości betonu z mieszankami trójskładnikowymi była gęstsza matryca uzyskana dzięki zastosowaniu drobniejszych frakcji, a mianowicie pyłu krzemionkowego i popiołu lotnego (11). Zjawiska przyrostu wytrzymałości betonu przepuszczalnego były również dokładnie badane w celu poznania wpływu popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego (12). Przeprowadzono doświadczenia na betonie klasy M70 z zastosowaniem ultra drobnego żużla i popiołu lotnego, które dały podobny efekt, w porównaniu z cementem żużlowym (13). Aby poznać wpływ popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego na właściwości mechaniczne BDW, przeprowadzono również badania porównawcze (14).

Adithya i in. (15), analizowali właściwości mikrostrukturalne mieszanek betonowych przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej. Kanta Rao i in. (16) z powodzeniem badali wpływ różnych udziałów dodatków mineralnych na właściwości mechaniczne i mikrostrukturalne betonu.

W ciągu ostatniej dekady wielu badaczy próbuje symulować projekty mieszanek, stosując modelowanie matematyczne. Model matematyczny definiuje stan układu przy użyciu modeli matematycznych i może przyjąć dowolną formę, np. systemów dynamicznych, modeli statystycznych, równań różniczkowych, czy też modeli opartych na teorii gier (17). Pojedynczy model regresji może pomóc w uproszczeniu żmudnych i czasochłonnych obliczeń związanych z projektowaniem mieszanki.

Faezehossadat Khademi i in. (18) stwierdzili, że modele oparte na danych, przykładowo na Sztucznych Sieciach Neuronowych SSN, wykazały większą dokładność z ograniczeniami niewymiarowymi jako dodatkowymi parametrami wejściowymi podczas symulacji właściwości mechanicznych betonu z wykorzystaniem kruszywa z recyklingu. Deshpande i in. (19) wykazali, że modele SSN dają lepszą przewidywalność i niezawodność dla betonu z recyklingu kruszywa podczas symulacji. Maruthachalam i in. (17) zastosowali metody statystyczne do określenia różnych właściwości betonu wysokosprawnego wzmacnianego włóknami [FRHPC] z wykorzystaniem makro włókien poliolefinowych [MWP]. Opracowany model można było odpowiednio dopasować do danych doświadczalnych, zgodnie z analizą wariancji [ANOVA]. Deepa i in. (1) przewidywali wytrzymałość betonu wartościowego, stosując algorytmy, na przykład perceptron wielowarstwowy, modele drzew M5P oraz regresję liniową. Padmanaban i in. (20) opracowali model statystyczny dla BDW zawierających popiół lotny w dużej i małej ilości, który przewiduje dokładne wyniki dla odpowiednich czasów dojrzewania. Dhanya Sathyan i in. (21) do symulacji parametrów reologicznych w różnych temperaturach zastosowali model Binghama i Her-

The influence of fly ash and silica fume were separately studied, to explain their effect on the permeability and mechanical properties of high-performance concrete (9). After careful and numerous studies, it was concluded, that the strength gain of the concrete using silica fume and fly ash as ternary blend exhibited superior properties as the ordinary concrete (10). The reason for better strength of concrete with ternary blends was due to the denser matrix achieved to the usage of finer particles such as silica fume and fly ash (11). The strength gain phenomena of pervious concrete were also thoroughly studied to explain the combined effect of fly ash and silica fume (12). Experiments were conducted on M70 grade concrete using ultra-fine slag and fly ash which had a similar effect compared to the slag cement (13). To know the effect of fly ash and silica fume on the mechanical properties of the HSC, a comparative study was also conducted (14).

Adithya et al. (15), analysed the microstructural properties of the concrete mixes using SEM. Kanta Rao et al. (16) successfully experimented with the effect of different percentages of SCMs on the mechanical and microstructural properties of concrete.

Like any other process, many researchers have been attempting simulation of mixed design by mathematical modelling since the last decade. A mathematical model defines a condition using mathematical ideas and can take any form, such as dynamical systems, statistical models, differential equations, or game-theoretic models (17). A single regression model can help to simplify the otherwise tedious and time-consuming mix design calculations.

Faezehossadat Khademi et al. (18) were found that the data-trained models like the ANN [Artificial Neuron Network] showed greater accuracy with the non-dimensional constraints as additional input parameters while simulating the mechanical properties of concrete using the recycled aggregate. Deshpande et al. (19) made evident that the ANN models give the better predictability and reliability for recycled aggregate concrete while simulation. Maruthachalam et al. (17) employed statistical methods to identify different properties of fiber reinforced high-performance concrete [FRHPC] using Polyolefin Macro-Monofilament [PMM] fibres. The developed model adequately fit the experimental data, according to the analysis of variance [ANOVA]. Deepa et al. (1) predicted the strength of the high-performance concrete by using algorithms like Multilayer Perceptron, M5P Tree models, and Linear Regression. Padmanaban et al. (20) developed a statistical model for HSC containing high and low content of fly ash, which predicts accurate results for the respective ages. Dhanya Sathyan et al. (21) used the Bingham and Herschel–Bulkley model to simulate rheological parameters at different temperatures. The same was analysed through a Random Kitchen Sink algorithm and the model was found to be capable of accurately predicting the rheological parameter within their experimental region. Chase (22) stated that it is difficult to forecast changes related to a specific pattern or relationship, the timing, and the magnitude of the change. Charhate et al. (23) predicted workability and compressive strength of concrete properties using MLR [Multiple Linear Regression] and ANN. In the research by Zain et al. (24), a multiple non-linear regression

schela-Bulkleya. Taką samą analizę autorzy przeprowadzili za pomocą algorytmu Random Kitchen Sink i okazało się, że model jest w stanie dokładnie przewidzieć parametry reologiczne w zakresie badań doświadczalnych. Chase (22) stwierdził, że trudno jest przewidzieć zmiany związane z konkretnym wzorcem lub relacją, a także określić czas i wielkość zmiany. Charhate i in. (23) przewidywali wytrzymałość i wytrzymałość na ściskanie betonu za pomocą metod MLR i ANN. W badaniach Zain i in. (24), stosując analizę statystyczną wyników badań opracowano model regresji nielinowej wielokrotnej, który wykazał dobrą korelację dla przewidywania wytrzymałości na ściskanie.

2. Znaczenie badań

Niniejsze opracowanie koncentruje się na uzyskaniu betonu o dużej wytrzymałości [BDW] przez częściowe zastąpienie cementu dodatkami mineralnymi. W artykule omówiono właściwości płynięcia trójskładnikowych mieszanek cementowych przez badanie metodą mini stożka opadowego, analizę rozmieszczenia ziaren metodą gęstości nasypowej, przeprowadzoną w celu optymalizacji jamistości oraz właściwości mieszanek BDW i stwardniałego betonu. Zaproponowano również model wielokrotnej regresji liniowej [WRL] do przewidywania wytrzymałości na ściskanie mieszanek trójskładnikowych dla różnych proporcji składników.

3. Program badań

3.1. Materiały

We wstępnych etapach dokładnie zbadano właściwości fizyczne i chemiczne składników stosowanych do produkcji BDW. Jeśli wyniki badań mieszczą się w określonym zakresie, składniki są dalej wykorzystywane; w innym przypadku powtarza się tę samą metodę badania.

3.1.1. Cement

W badaniu zastosowano dostępny na rynku cement portlandzki klasy 53 zgodny z normą IS 12269 (2013) (25). Zbadano również właściwości fizyczne i ich odpowiednie chemiczne, które zostały podane w tablicy 1.

Tablica 1 / Table 1

WŁASCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU, PYŁU KRZEMIONKOWEGO I POPIOŁU LOTNEGO

PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT, SILICA FUME, AND FLY ASH

Właściwość / Property	Cement	Pył krzemionkowy / Silica fume	Popiół lotny / Fly ash
Gęstość, Density, g/cm ³	3.10	2.20	2.18
Początek czasu wiązania / Initial setting time, min	40	-	-
Koniec czasu wiązania / Final setting time, min	220	-	-
Rozdrobnienie* / Fineness, %	3.3	-	-
Kolor / Colour	Szary / Grey	Szary / Grey	Jasnoszary / Light Grey
Wilgotność / Moisture, %	-	1.51	0.31

*zawartość ziaren większych niż 90 mm

model was generated by the statistical analysis of their test results, which showed a good correlation for predicting the compressive strength values of HSC.

2. Research significance

This study focuses on achieving HSC by the partially replacing cement with SCMs. This paper discusses the flow properties of ternary blended cementitious material by mini-slump cone test, placing density approach for reducing voids, fresh concrete mix and hardened HSC properties. Also, a Multi Linear Regression [MLR] model is proposed to predict the compressive strengths of ternary blended mixes for varying proportions of ingredients.

3. Experimental

3.1. Materials

The physical and chemical properties of the ingredients used in the production of HSC, were thoroughly investigated in the preliminary stages of the research. If the test results fall in the specified range the ingredients are further used else, the same methods of examination, is repeated.

3.1.1. Cement

Commercially available OPC 53 grade was used in the entire study confirming the IS 12269 (2013) (25). The physical properties and their respective chemical properties were also tested and they have been given in Table 1.

3.1.2. Silica fume

The silica fume used in the entire study is commercially available and it is a kind of the by-product discarded from steel and silicon alloys industries. Silica fume and their composition confirm with IS 15388 (2003) (26). The physical properties of silica fume are shown in Table 1. Chemical composition of silica fume is given in Table 2.

3.1.3. Fly ash

The unburned residue from pulverized coal or lignite combustion is utilized as a pozzolanic mineral additive. Fly ash is collected from flue gases of the power plants that use powdered coal as a

3.1.2. Pył krzemionkowy

Zastosowany w badaniach pył krzemionkowy jest dostępny w handlu i stanowi rodzaj produktu ubocznego z przemysłu stopów stali i krzemu. Jego skład jest zgodny z normą IS 15388 (2003) (26). Właściwości fizyczne pyłu krzemionkowego przedstawiono w tablicy 1.

3.1.3. Popiół lotny

Niespalona pozostałość po spaleniu węgla kamiennego lub brunatnego jest wykorzystywana jako pucolanowy dodatek mineralny. Popiół lotny jest zbierany ze spalin elektrowni wykorzystujących sproszkowany węgiel jako paliwo za pomocą separatorów mechanicznych lub elektrostatycznych (13). W tym badaniu popiół lotny został zebrany w elektrowni Mettur, Tamilnadu [Indie]. Skład fizyczny zastosowanej tu próbki popiołu lotnego przedstawiono w tablicy 1. Z danych uzyskanych wynika, że suchy popiół lotny zakwalifikowano do klasy F zgodnej z normą IS 3812 (2003) (27).

3.1.4. Kruszywo drobne i grube

Ze względu na wzrost zapotrzebowania na materiały budowlane należy stosować alternatywę dla piasku rzecznego. Taką alternatywą jest piasek kruszony, który otrzymuje się po skruszeniu głazów skalnych. Te pokruszone cząstki skalne są dalej kruszone w kruszarkach, aby uzyskać alternatywny materiał budowlany znany jako piasek typu M. Do wykonania betonu użyto kruszywa drobnego i grubego o maksymalnym uziarnieniu 4,75 i 20 mm. Oba kruszywa były wolne od pyłów, innych zanieczyszczeń, a właściwości fizyczne kruszyw podano w Tablicy 3. Miąkość piasku M zmierzono jako 3,38, a materiał zaliczono do strefy II zgodnie z normą IS 383 (2016) (28).

3.1.5. Domieszka do betonu

W celu uzyskania wymaganego opadu stożka, zaprojektowana proporcja mieszanki musi mieć wystarczającą urabialność. Dodanie do betonu materiału pucolanowego, jakim jest pył krzemionkowy, zmniejsza urabialność mieszanki betonowej (12). W przypadku stosowania dodatków mineralnych, mianowicie popiół lotny i pył krzemionkowy, wpływ wielkości ziarna i rozkładu wielkości ziaren, odgrywa ważną rolę w kształtowaniu urabialności betonu. Aby

Tablica 3 / Table 3

WŁASCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYW
PHYSICAL PROPERTIES OF AGGREGATES

Właściwość / Property	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube Coarse aggregate
Gęstość / Density, g/cm ³	2.71	2.70
Wilgotność / Moisture content, %	0.341	0.538
Gęstość nasypowa / Bulk density, kg m ⁻³	1768	1605
Nasiąkliwość / Water absorption, %	3.02	0.53
Wskaźnik płaskości / Flakiness index, %	-	20.19
Wskaźnik wydłużenia / Elongation index, %	-	22.45
Odporność na uderzenie / Impact value, %	-	8.74

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY PYŁU KRZEMIONKOWEGO ORAZ POPIOŁU LOTNEGO

CHEMICAL COMPOSITION OF SILICA FUME, AND FLY ASH

Chemical analysis (%)	Silica fume	Fly ash
SiO ₂	87.63	56.30
Al ₂ O ₃	0.25	33.16
FeO	-	6.32
CaO	0.73	0.50
MgO	0.54	0.72
SO ₃	1.46	-
K ₂ O	8.14	0.80
Na ₂ O	1.14	0.01
TiO ₂	0.11	2.19

fuel with the hoppers, which are mechanical or electrostatic separators (13). In this investigation, fly ash was collected from the Mettur power plant, Tamilnadu, India. The physical composition of the sample of fly ash used here is shown in Table 1. The chemical composition is given in Table 2. Based on the obtained results, fly ash used in the study was identified as Class F conforming to IS 3812 (2003) (27).

3.1.4. Fine and coarse aggregate

Due to the increase in demand for construction materials, an alternate for river sand has to be used. M-sand is such an alternative which is obtained after crushing the rock boulders. These crushed rock particles are further crumbled in the crushers to yield alternative construction material known as M-sand. The fine and coarse aggregates of maximum size 4.75 and 20mm were used for concrete preparation. Both the aggregates were free from dust and other impurities, as well as the physical properties of aggregates were given in Table 3. The fineness modulus of M-sand was measured as 3.38, and the material was confirmed as Zone II, as per IS 383 (2016) [28].

3.1.5. Chemical Admixture

In order to achieve the required slump, the designed mixture proportion must have enough workability, to fulfill the required guidelines. The addition of pozzolanic material like silica fume to the concrete, reduces the workability of the fresh concrete (2). When SCMs, such as fly ash and silica fume are used, the effect of grain size and particle size distribution, play a vital role in the workability of the concrete. To meet the requirement, chemical admixture was used to attain the desired slump. The optimum dosage of SP is dependent on the type of SP and the water to binder ratio (13). In this study, the polycarboxylate ether [PCE] based superplasticizer – Sika Plast 5202 NS was used as per IS 9103 (1999) (29) to reduce the content of water up to 30%. It appears as a dark brown liquid at room temperature. It

spełnić ten warunek, zastosowano domieszki do betonu w celu uzyskania pożądanego opadu stożka. Optymalny dodatek SP zależy od jego rodzaju i stosunku wody do spoiwa [W/C] (13). W niniejszej pracy zastosowano superplastyfikator z eteru polikarboksylanowego [PCE] - Sika Plast 5202 NS zgodnie z normą IS 9103 (1999) (29) w celu zmniejszenia ilości wody zarobowej do 30%. W temperaturze pokojowej występuje jako ciemnobrązowa ciecz. Ma gęstość 1,08 kg/dm³ i wartość pH większą lub równą 6. Stwierdzono, że zawartość chlorków wynosi zero.

3.1.6. Woda zarobowa

Do badań zastosowano lokalnie dostępную wodę pitną. Była ona pozbawiona olejów, kwasów, zasad, soli i związków organicznych. Została użyta do przygotowania i pielęgnacji próbek betonowych, zgodnie z normą IS 456 (2000) (30).

3.2. Metody

3.2.1. Skład mieszanki betonowej

Projekt mieszanki dla betonu klasy M65 został obliczony dla dziesięciu różnych proporcji zgodnie z normą IS 10262 (2019) (2), przy stałym stosunku wodno-cementowym 0,3, a szczegóły podano w tablicy 4. W niniejszej pracy, cement portlandzki klasy 53 został częściowo zastąpiony przez pył krzemionkowy odpowiednio w ilości 2,5, 5, 7,5, 10% oraz popiół lotny w ilości 5, 10, 15%. Wybrano dziesięć mieszanek betonowych w oparciu o zawartość cementu w zakresie od 400 do 450 kg/m³. Rozmieszczenie ziaren w betonie ma duży wpływ na jego właściwości użytkowe (4,5). Tak więc objętość kruszywa drobnego i grubego została ustalona w oparciu o gęstość mieszanki betonowej.

3.2.2. Przygotowanie próbek

Do badań przygotowano różne próbki: sześciennie 100 x 100 x 100 mm do pomiaru wytrzymałości na ściskanie, próbki cylindryczne φ100 x 200 mm do oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywanie oraz belki 100 x 100 x 500 mm do próby zginania. Dla każdej mieszanki formowano trzy próbki i badano po 7, 14 i 28 dniach twardnienia. Jako kryterium zatwierdzenia przyjęto, że odchylenie poszczególnego wyniku od średniej powinno być mniejsze niż 15% wartości średniej. Jeśli wynik badania przekraczał wymaganą granicę, pomiar powtarzano dla tej mieszanki. Do oceny właściwości mechanicznych BDW wykorzystano średnią z wartości uzyskanych dla każdej mieszanki.

3.2.3. Analiza regresji

Modele statystyczne wykorzystują równania matematyczne do analizy danych i mogą uzyskać wyniki szybko i z dobrą dokładnością. Nawet w przypadku zagadnień, w których ostatecznie lepiej sprawdzą się bardziej elastyczne metody uczenia maszynowego, modele statystyczne mogą posłużyć jako podstawowe dane do oceny bardziej zaawansowanych układów. Regresja jest metodą statystyczną, a jej dwa podstawowe rodzaje nazywane są prostą regresją liniową i wielokrotną. Metoda prostej regresji liniowej,

has a density of 1.08 kg/l and the pH value greater than or equal to 6. The chloride content was measured to be zero.

3.1.6. Water

Locally available potable water, free from oils, acids, alkalis, salts, and organic compounds, was used to mix and cure concrete specimens as per IS 456 (2000) (30).

3.2. Experimental methods

3.2.1. Concrete mix proportions

The mix design for M65 grade concrete was calculated for ten different mixing proportions as per IS 10262 (2019) (2), with the constant water-cement ratio of 0.3, and the details are given in Table 4. In this present study, OPC 53 grade was partially replaced with silica fume by 2.5, 5, 7.5, 10%, and fly ash by 5, 10, 15%, respectively. Ten concrete mixes were selected based on the cement content ranging from 400 to 450 kg/m³. The particles distribution in concrete has a significant impact on concrete performance (4,5). So, the volume of fine and coarse aggregates were fixed, based on the density of concrete mix.

3.2.2. Preparation of samples

Different samples were cast for this study. Cube samples 100 x 100 x 100 mm for compressive strength measurement, cylindrical samples φ100 x 200 mm for splitting tensile strength, and prism samples 100 x 100 x 500mm for the flexural strength tests. For each mix, three specimens were cast and tested after 7, 14, and 28 days of curing, and the acceptance criteria for each mix should be less than 15% of the average value. If the test results were more than the required limit, the test was repeated for this mix. The average of the values obtained from each mix was used to evaluate the mechanical properties of HSC.

3.2.3. Regression analysis

Statistical models use mathematical equations to encode the data and can deliver results quickly and accurately. Even for issues where more flexible machine learning methods may eventually work better, statistical models can be utilized as a basic model to evaluate the performance of more advanced systems. Regression is a statistical method, and the two basic types are called simple linear regression and multi-linear regression. The simple linear regression method uses an independent variable to explain or predict the outcome of the dependent variable Y, while multiple linear regression uses two or more independent variables to predict the result (19, 23). In multiple non-linear regression, there are multiple regressor [x] variables such as $x_1, x_2 \dots x_n$, and model non-linear with the coefficients. The linear regression methods are used for more complicated data and analysis. It is used to model complex phenomena which linear models cannot handle. However, in this research, compressive strength is assumed to be the single dependent variable influenced by 9 different single regressor independent variables. SPSS is a complete software package for

wykorzystuje zmienną niezależną do wyjaśnienia lub przewidywania, wyniku zmiennej zależnej Y. Natomiast wielokrotna regresja liniowa wykorzystuje dwie lub więcej zmiennych niezależnych do przewidywania wyniku (19,23). W regresji nieliniowej wielokrotnej występuje wiele zmiennych objaśniających [x]: $x_1, x_2 \dots x_n$, natomiast model nieliniowy ze współczynnikami. Metody regresji liniowej są stosowane w przypadku bardziej skomplikowanych danych i analiz. Stosuje się ją do modelowania złożonych zjawisk, do których nie nadają się modele liniowe. Jednak w niniejszym badaniu przyjęto, że wytrzymałość na ściskanie jest pojedynczą zmienną zależną, na którą ma wpływ 9 różnych zmiennych niezależnych o pojedynczej regresji. SPSS to kompletny pakiet oprogramowania do analizy statystycznej, zarządzania danymi, który może obsługiwać do 200 zmiennych (31). Narzędzia statystyczne SPSS są dostępne w rozwijanych programach lub mogą być rozwijane za pomocą autorskiego programowania składni polecień. W celu symulacji danych wejściowych regresji, podaje się np. ilość kruszyw czy domieszek jako dane wejściowe, które służą do symulowania składu mieszanki.

4. Wyniki doświadczalne i dyskusja

4.1. Rozpływ zaczynu cementowego

Optymalny dodatek zapewniający nasycenie dla mieszanki opartej na PCE, określono za pomocą badania mini stożka opadowego, w którym maksymalny rozpływ bez wydzielenia mleczka cementowego uznano jako najlepszą do nasycenia (8). W badaniach zastosowano stożek o średnicy górnej 19 mm, dolnej 38 mm i wysokości 57 mm (rys. 1). Przygotowano zaczyn cementowy i wypełniono nim stożek trzema warstwami, aby uniknąć pęcherzyków powietrza. Stożek ostrożnie podniesiono tak, aby zaczyn rozpadł się na szklanej płytce. Rejestrowano czas potrzebny do osiągnięcia średnicy rozprysku 115 mm. Średnią średnicę rozprysku mierzono w dwóch prostopadłych kierunkach po całkowitym zatrzymaniu płynięcia.

Krzywe czasu płynięcia mini stożka i średnicy rozprysku zmierzono po 5 i 60 minutach dla różnych porcji PCE przy stałym stosunku wodno-cementowym 0,273. Optymalny dodatek – punkt nasycenia odnośnie do czasu płynięcia, określono w momencie, gdy obie krzywe zbiegają się ze sobą lub są do siebie zbliżone. Optymalne dodatki zostały dodatkowo sprawdzone i potwierdzone krzywą rozprysku w zakresie od 152 mm do 171 mm – 4 do 4,5 średnicy dna. Na rys. 2 przedstawiono krzywe czasu płynięcia i rozprysku mini stożka, dla różnych zaczynów cementowych i dawek superplastyfikatora. Po osiągnięciu maksymalnego rozprysku, dalsze zwiększenie dawki SP, powodowało wyciekanie mleczka cementowego. Czas rozprysku zwiększał się wraz ze zwiększeniem udziału dodatku mineralnego.

statistical analysis, data management that can accommodate up to 200 variables (31). The statistical tools of SPSS are accessed in the pull-down menus or can be programmed with a proprietary command syntax programming. To simulate the regression inputs such as the quantity of the aggregates and admixtures are given as input to simulate the mixture proportions.

4. Experimental results and discussion

4.1. Flow behaviour of cementitious paste

The optimum saturation dosage for PCE-based mixes was determined using a mini-slump in which the maximum spread without bleeding is identified as the optimum saturation dosage (8). In this study, cone proportion with the top diameter of 19 mm, bottom diameter of 38 mm, and height of 57 mm was used [Fig. 1]. The cement paste was prepared and filled in the cone with three layers to avoid the air bubbles. The cone was lifted with care and the paste was allowed to spread on the glass plate. The time required to reach the spread diameter of 115 mm was recorded. The average spreading diameter is measured in two perpendicular directions after the flow stops completely.

The mini-slump flow time and spread diameters curves were measured after 5 and 60 minutes for different dosages of PCE with the constant water binder ratio of 0.273. The optimum dosage from flow time was identified when both curves meet or are closer to each other. The optimum dosage was additionally checked and confirmed with the propagation curve of the range from 152 mm to 171 mm [4 to 4.5 of bottom diameter]. The mini-slump flow time and spread curves, for different cementitious pastes and dosage of superplasticizer, are shown in Fig. 2. After reaching a maximum propagation, further, increase in the SP dosage caused bleeding. The flow time value increased as the percentage of SCMs increased irrespective of the binders.

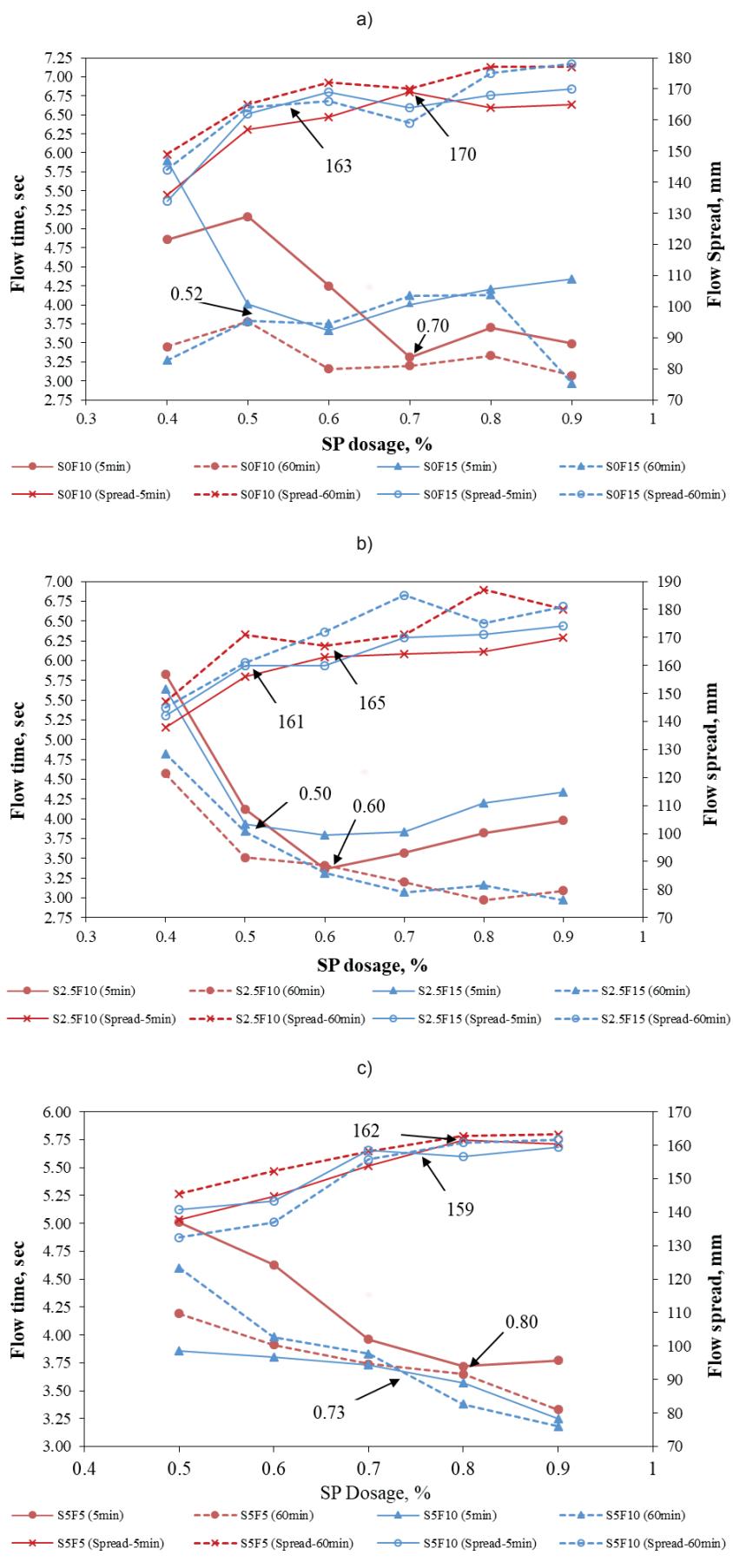
4.2. Distribution density of the grains in aggregates

The density distribution of grains is used to reduce the large pores content, increase the density of high-strength concrete (5,6). In this method, four different coarse aggregates with the size range



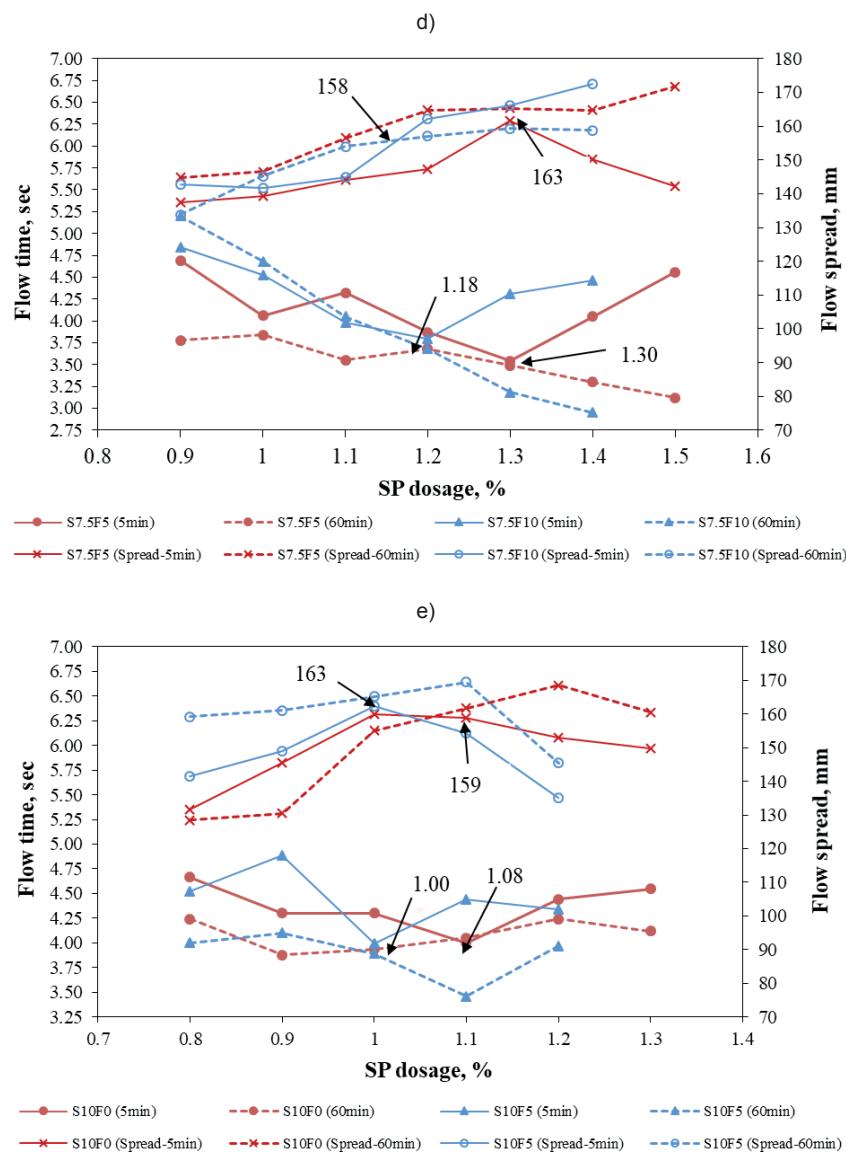
Rys. 1. Zestaw do pomiaru konsystencji zaczynów

Fig. 1. Mini slump test setup



Rys. 2a, b, c. Rozpływ i czas rozpływów zaczynów o różnej zawartości spoiwa i różnym dodatku domieszki upłynnijającej

Fig. 2a, b, c. Flow time, flow propagation versus PCE dosage for different cementitious paste



Rys. 2d, e. Rozpływ i czas rozpływów zaczynów o różnej zawartości spojwa i różnym dodatku domieszki upływniającej

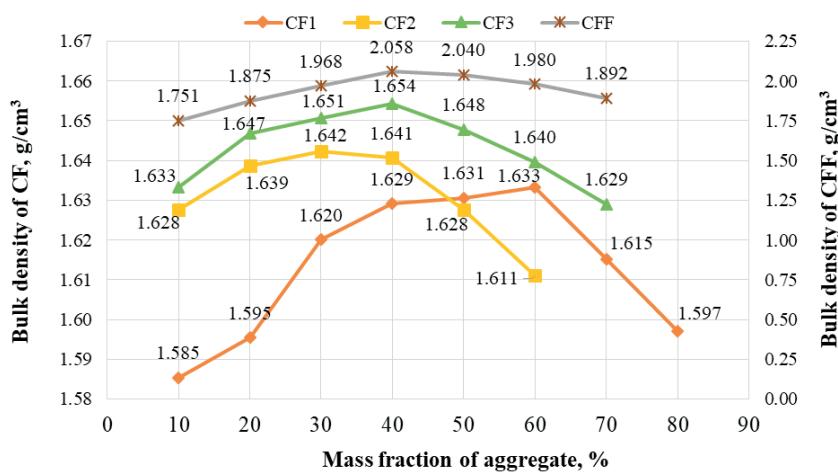
Fig. 2d, e. Flow time, flow spread versus PCE dosage for different cementitious paste

4.2. Gęstość rozmieszczenia ziaren w kruszywie

Metoda gęstości rozmieszczenia ziaren jest stosowana w celu zmniejszenia dużych porów pomiędzy ziarnami i zwiększenia gęstości betonu o dużej wytrzymałości (5,6). W metodzie tej zastosowano cztery różne kruszywa grube, o wymiarach 20-16 mm [A1], 16-12,5 mm [A2], 12,5-10 mm [A3], 10-4,75 mm [A4], a wymiary kruszywa drobnego wynosiły 4,75 mm-150 µm [A5]. Gęstość właściwą każdej frakcji A1, A2, A3, A4 i A5 wyznaczono jako: 2,745, 2,751, 2,754, 2,798, i 2,696 g/cm³. Do określenia gęstości nasypowej przyjęto średnią wartość ciężaru właściwego, a poszczególne dane przyjęto do obliczenia procentowej zawartości dużych porów i gęstości rozmieszczenia ziaren.

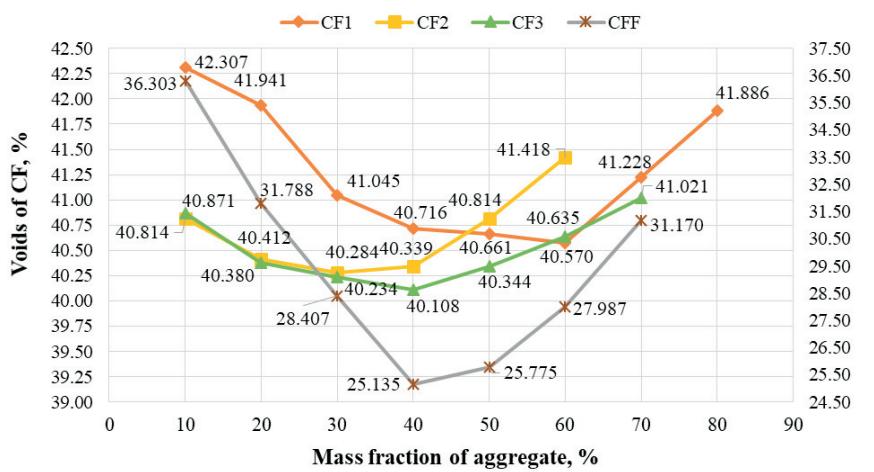
Pojemnik stosowany w tym badaniu jest cylindryczną formą o pojemności 15 litrów, średnicy wewnętrznej 250 mm i wysokości wewnętrznej 300 mm, zgodnie z normą IS 2386-3 (1963) (32). Zastosowano trzy frakcje dużych [CF] i jedną frakcję małych ziaren [CFF] kruszyw mieszanych, a mianowicie A1 i A2 [CF1], A1-A2 i A3

of 20-16 mm [A1], 16-12.5 mm [A2], 12.5-10 mm [A3], 10-4.75 mm [A4], and the size of fine aggregate were 4.75 mm-150 µm [A5]. The specific density of each fraction A1, A2, A3, A4, and A5 was calculated as 2.745, 2.751, 2.754, 2.798, and 2.696. The average specific density was taken to identify the bulk density, and the individual values were used for the calculation of voids content and distribution density. The container used for this examination was a cylindrical mould with a 15-liter capacity, 250 mm internal diameter, and 300 mm internal height as per IS 2386-3 (1963) (32). Three coarse fractions [CF] and one fine fraction [CFF] of aggregates such as A1 and A2 [CF1], A1-A2 and A3 [CF2], A1-A2-A3 and A4 [CF3], A1-A2-A3-A4, and A5 [CFF] were used. The aggregates were partially replaced with lower size aggregates and mixed thoroughly with different proportions such as 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, etc., by the total mass. Loose and compacted weight of aggregates was determined, the bulk density, voids ratio, and distribution density of aggregates were determined for each fraction of aggregates.



Rys. 3. Gęstość nasypowa mieszanek kruszyw

Fig. 3. Bulk density of aggregates



Rys. 4. Jamistość mieszanek kruszywowych

Fig. 4. Voids percentage of aggregates

[CF2], A1-A2-A3 i A4 [CF3], A1-A2-A3-A4, i A5 [CFF]. Kruszywo zostało częściowo zastąpione niejszymi ziarnami i dokładnie zmieszane w różnych proporcjach np. 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 itd., w stosunku do masy całkowitej. Oznaczono masę luźno sypanego i zagęszczonego kruszywa, gęstość nasypową, współczynnik dużych porów i gęstość rozmieszczenia ziaren kruszywa dla każdej frakcji kruszywa.

Kruszywo CF1 osiąga maksymalną gęstość nasypową $1,633 \text{ g/cm}^3$ przy stosunku 40:60 [A1:A2]. Maksymalna gęstość nasypowa CF2 osiąga $1,642 \text{ g/cm}^3$ przy 30% zastąpieniu kruszywa A3 w stosunku 28:42:30 – A1:A2:A3. Gęstość nasypowa CF3 osiąga ostateczny zakres $1,654 \text{ g/cm}^3$ przy 40% zastąpieniu kruszywa A4 w stosunku 16,8:25,2:18:40 – A1:A2:A3:A4. Frakcję kruszywa grubego CF3 zmieszano z kruszywem drobnym – A5 i zbadano gęstość nasypową CFF. Gęstość nasypowa CFF osiągnęła $2,058 \text{ g/cm}^3$ przy 40% zastąpieniu A5, przy optymalnym za-

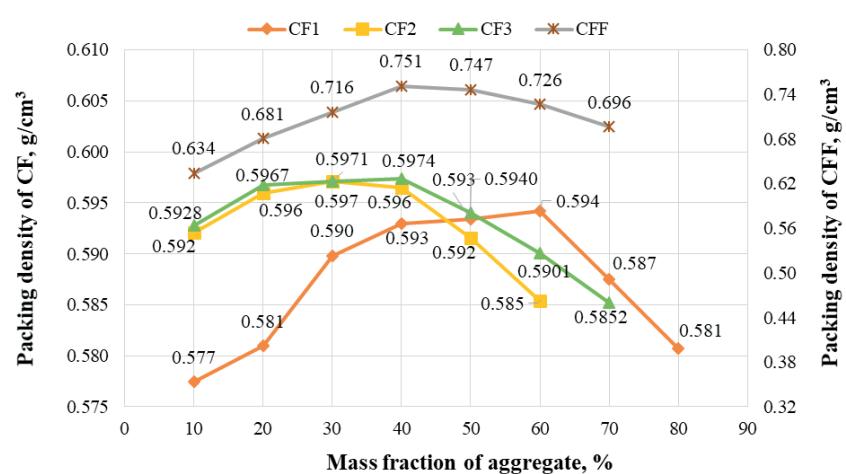
Aggregate CF1 reaches the maximum bulk density of 1.633 g/cm^3 at the ratio of 40:60 [A1:A2]. The maximum bulk density of CF2 reaches 1.642 g/cm^3 at 30% replacement of A3 aggregates with the ratio of 28:42:30 [A1:A2:A3]. The bulk density of CF3 reaches the ultimate range of 1.654 g/cm^3 at 40% replacement of A4 aggregates with the ratio of 16,8:25,2:18:40 [A1:A2:A3:A4]. The coarse aggregate fraction CF3 was mixed with the fine aggregate [A5], and the bulk density of CFF was examined. The bulk density of CFF was reached 2.058 g/cm^3 at 40% replacement of A5, with the optimum range of 60:40 [CF3:A5]. The bulk density values for all the fractions of aggregates were mentioned in Fig. 4.

The increase in partial replacement of lower size aggregates with coars fraction CF1, CF2, and CF3 reduced the voids percentage to 40.57, 40.284, and 40.108%. The partial replacement of fine aggregate further reduced the voids by 25.13%, and the details are mentioned in Fig. 4. The increase of bulk density and decrease percentage of pores, improved the distribution packing density in all the four fractions as 0.594 , 0.5971 , 0.5974 , and 0.751 g/cm^3 , and the results are presented in Fig. 5.

4.3. Fresh concrete mix properties

The fresh concrete properties were determined by the slump cone test as per IS 1199 (1959) (33). The superplasticizer helps to improve the workability and allows for the reduction of the

water/cement ratio. This will aid in reducing the volume of pores and thereby augmented the compressive strength of concrete (7). The optimum dosage of PCE calculated by mini-slump cone test



Rys. 5. Stopień upakowania przestrzeni dla mieszanek kruszywowych

Fig. 5. The packing density of aggregates

Tablica 4 / Table 4

SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH

COMPOSITION OF MIX PROPORTION FOR EACH CONCRETE MIX

Mix	Cement		Silica Fume A ₁ (16.8%)		Fly ash A ₂ (25.2%) A ₃ (18%)		Coarse aggregate (60%)				Fine aggregate, A ₅ (40%)	Water	w/cm	Admixture	
							A ₄ (40%)								
	%	kg/m ³	%	kg/m ³	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	
S0F10	90	442.6	0	0	10	49.2	188.4	282.7	201.9	448.7	750.6	134.1	0.273	0.7	3.44
S0F15	85	418.0	0	0	15	73.8	187.8	281.6	201.2	447.0	747.8	134.1	0.273	0.52	2.56
S2.5F10	87.5	430.3	2.5	12.3	10	49.2	188.1	282.2	201.6	447.9	749.3	134.1	0.273	0.6	2.95
S2.5F15	82.5	405.7	2.5	12.3	15	73.8	187.3	281.0	200.7	446.0	746.2	134.1	0.273	0.5	2.46
S5F5	90	442.6	5	24.6	5	24.6	188.3	282.5	201.8	448.4	750.2	134.1	0.273	0.8	3.93
S5F10	85	418.0	5	24.6	10	49.2	187.5	281.3	200.9	446.5	746.9	134.1	0.273	0.73	3.59
S7.5F5	87.5	430.3	7.5	36.9	5	24.6	187.3	280.9	200.7	445.9	745.9	134.1	0.273	1.3	6.39
S7.5F10	82.5	405.7	7.5	36.9	10	49.2	186.5	279.8	199.8	444.1	742.9	134.1	0.273	1.18	5.80
S10F0	90	442.6	10	49.2	0	0	188.0	282.0	201.5	447.7	748.9	134.1	0.273	1.08	5.31
S10F5	85	418.0	10	49.2	5	24.6	187.2	280.8	200.6	445.7	745.7	134.1	0.273	1	4.92

kresie 60:40 [CF3:A5]. Wartości gęstości nasypowej dla wszystkich frakcji kruszywa podano na rys. 3.

Zwiększenie częściowego zastąpienia kruszywa o mniejszych wymiarach frakcją grubą CF1, CF2 i CF3 zmniejszył procentową zawartość dużych porów do 40,57, 40,284 i 40,108%. Częściowe zastąpienie kruszywa drobnego dodatkowo zmniejszyło pory o 25,13%, a szczegóły przedstawiono na rys. 4. Zwiększenie gęstości nasypowej i zmniejszenie procentu jamistości poprawiło gęstość nasypową, we wszystkich czterech frakcjach na poziomie – odpowiednio 0,594, 0,597, 0,597 i 0,751 g/cm³, a wyniki przedstawiono na rys. 5.

4.3. Właściwości mieszanki betonowej

Właściwości mieszanki betonowej określono na podstawie badania opadu stożka, zgodnie z normą IS 1199 (1959) (33). Superplastifikator pomaga poprawić urabialność i pozwala na zmniejszenie stosunku wodno-cementowego. Pomoże to w zmniejszeniu objętości porów i tym samym zwiększyć wytrzymałość na ściskanie betonu (7). W każdej mieszaninie betonowej dodawano optymalną dawkę PCE obliczoną na podstawie badania metodą mini stożka opadowego i określano konsystencję mieszaniny. Konsystencja mieszaniny betonowej zwiększała się wraz ze wzrostem zawartości pyłu krzemionkowego, a malała wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego. Zmiany opadu stożka w zależności od zawartości cementu w mieszaninach betonowych przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Zawartość cementu i opad stożka w mieszaninach betonowych

Fig. 6. Cement content and slump readings for different concrete mixes

was added in each concrete mix, and the workability was identified. The workability of concrete mix increases with the increase of silica fume and decreases with an increase in fly ash content. The variation in slump values with cement content in the concrete mixes is shown in Fig. 6.

4.4. Hardened concrete properties

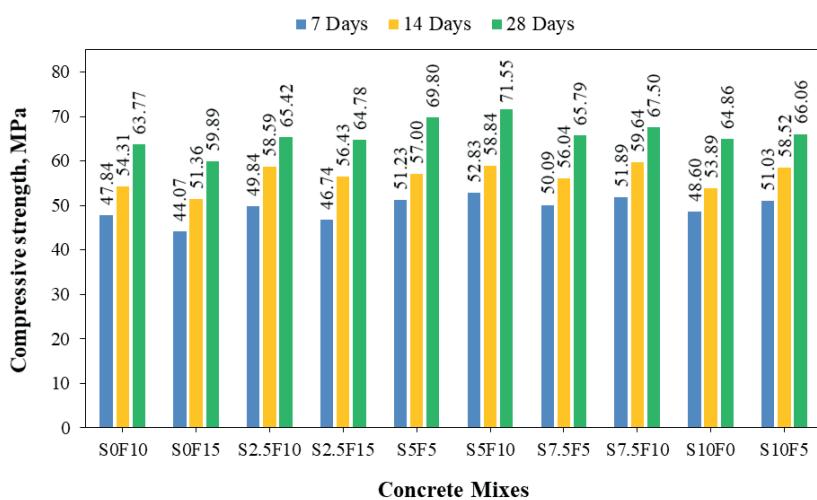
4.4.1. Compressive strength

The compressive strength of M65 grade concrete at 7, 14, and 28 days of curing was examined as per IS 516 (1959) (34), and the results are represented in Fig. 7. The concrete mix S5F10 reaches a compressive strength of 52.83 MPa after 7 days, whereas S0F15 reaches 44.07 MPa at the same age. At this age, the performance of S5F10 samples were higher than S0F15 by 19.8% and also higher than S10F0 samples by 8.7%. This trend remains

4.4. Właściwości stwardniałego betonu

4.4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie betonu klasy M65 po 7, 14 i 28 dniach twardnienia, badano zgodnie z normą IS 516 (1959) (34), a wyniki przedstawiono na rys. 7. Beton S5F10 osiąga w 7 dniu wytrzymałość na ściskanie 52,83 MPa, natomiast S0F15 w tym samym czasie osiąga 44,07 MPa. W tym wieku wytrzymałość próbek S5F10 była lepsza od S0F15 o 19,8%, a także większa od próbki S10F0 o 8,7%. Zmiany te pozostają mniej więcej takie same w 14 i 28 dniu. Wytrzymałość na ściskanie mieszanki S5F10 osiąga 58,84 i 71,55 MPa, odpowiednio po 14 i 28 dniach. Ze zmian na wykresie [rys. 7] stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie po wszystkich przedziałach wiekowych wykazywała lepsze wyniki dla 10% zastąpienia popiołem lotnym i dla stałej ilości zastąpienia pyłem krzemionkowym. Początkowy przyrost wytrzymałości betonów z 10% udziałem popiołu lotnego był większy w porównaniu z pozostałymi mieszankami. Generalnie, próbki o 5% zastąpieniu cementu pyłem krzemionkowym wypadły lepiej niż pozostałe próbki, niezależnie od dodatku popiołu lotnego. Zamiana cementu na poziomie 15% jak w S5F10 wypadła lepiej niż S0F15 i S10F5. 10% zastąpienie cementu jak w S5F5 dało lepsze wyniki, natomiast S0F10 i S10F0 nie mogły spełnić minimalnego wymagania 65 MPa. Wynika to z faktu, że pył krzemionkowy ma większy wpływ pucolanowy w porównaniu z popiołem lotnym. Pył krzemionkowy jest materiałem krzemionkowym o zawartości 87,6% SiO₂, a popiół lotny jest materiałem glinokrzemianowym o zawartości 56,3% SiO₂ i 33,16% Al₂O₃. Aby skuteczny zamiennik cementu spełniał kryteria klasy wytrzymałości M65, niezbędny jest udział obu tych składników w mieszaninie, w określonej ilości. Można podsumować, że próbki S5F10 wykazały najlepsze wyniki w zakresie wytrzymałości na ściskanie, podczas gdy S2.5F10, S5F5, S7.5F5, S7.5F10 i S10F5 zdołały osiągnąć dużą wytrzymałość M65. Można więc uogólnić, że ta trójskładnikowa mieszanka spełni wymagania wytrzymałości na ściskanie M65, tylko w przypadku 10-17,5% zastąpienia cementu przez co najmniej 5% pyłu krzemionkowego i popiół lotny.



Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie betonów ze spoiw mieszanych

Fig. 7. Compressive strength development for different concrete mixes

more or less the same after the 14th and 28th days. The compressive strength of the mix S5F10 reaches 58.84 and 71.55 MPa at 14 and 28 days, respectively. From the trends in the graph shown in Fig. 7, it was found that the compressive strength at all ages showed higher values for 10% replacement with fly ash, for a constant percentage of replacement with silica fume. The initial strength gain of mixes for 10% replacement with fly ash, was higher when compared with the other mixes. Generally, the samples with 5% replacements of the silica fume performed better than the remaining samples, irrespective of the value of replacement with fly ash. Cement replacement of 15% as in S5F10, performed better than S0F15 and S10F5. A 10% cement replacement as in S5F5 performed better, while S0F10 and S10F0 couldn't achieve the minimum requirement of 65 MPa. This is because silica fume has a better pozzolanic action as compared with fly ash. The silica fume is a siliceous material with 87.6% SiO₂, and fly ash is a siliceous and argillaceous material with 56.3% SiO₂ and 33.2% Al₂O₃. For a successful cement replacement to meet M65 criteria, we need these both in the mix in the adequate quantity. It can be summed up that the S5F10 samples showed the best performance of the compressive strength while S2.5F10, S5F5, S7.5F5, S7.5F10 & S10F5 succeeded in attaining M65 high strength requirement. So, it can be generalized that this ternary blended mix will satisfy M65 compressive strength, only for 10-17.5% replacement of cement with at least 5% of silica fume and fly ash.

4.4.2. Splitting tensile strength

The concrete cylindrical specimens were tested for tensile strength after curing of 7, 14, and 28 days as per IS 5816 (1959) (35), and the results are shown in fig. 7. The maximum tensile strength reached was 5.09 MPa and 5.45 MPa at 7 and 14 days of the S5F5 mix. The concrete mix S5F10 reaches the ultimate tensile strength of 5.94 MPa after 28 days of curing, and the results are given in Fig. 8. The mixes giving the better split tensile strength for M65 follows the same trend as in the case of compressive strength, i.e., S5F10 samples showed the best performance while S5F5, S7.5F10, S7.5F5, S2.5F10 and S10F5 were the next in the order.

4.4.3. Modulus of rupture

The concrete cylindrical specimens were tested for flexural strength (12), after curing of 7, 14, and 28 days as per IS 9399 (1979) (36) and the results are given in Fig. 9. The flexural strength results are in agreement with the trends for compressive strength and split tensile strength, with S5F5 and S5F10 showing much higher flexural strengths than other samples. From these tests on mechanical properties, it was observed that the 10% silica fume and 5% fly ash combinations were giving the better M65 concrete which is attributed to the pozzolanic reactions of the SCMs used.

4.4.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Badano wytrzymałość cylindrycznych próbek betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu po 7, 14 i 28 dniach twardnienia, zgodnie z normą IS 5816 (1999) (35). Maksymalna osiągnięta wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 5,09 MPa i 5,45 MPa po 7 i 14 dniach dla mieszanki S5F5. Mieszanka betonowa S5F10 miała po 28 dniach dojrzewania wytrzymałość na rozciąganie równą 5,94 MPa, a wyniki przedstawiono na rys. 8. Mieszanki dające lepszą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, wykazują taką samą tendencję jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie, tj. próbki S5F10 wykazały najlepsze wyniki, podczas gdy S5F5, S7.5F10, S7.5F5, S2.5F10 i S10F5 były następne w kolejności.

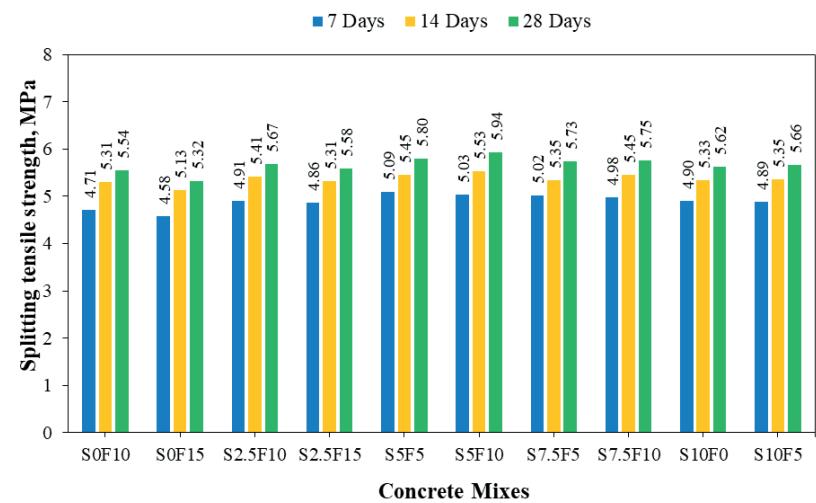
4.4.3. Wytrzymałość na zginanie

Badano wytrzymałość na rozciąganie (12) cylindrycznych próbek betonu po 7, 14 i 28 dniach twardnienia, zgodnie z normą IS 9399 (1979) (36). Maksymalna osiągnięta wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 5,09 MPa i 5,45 MPa po 7 i 14 dniach dla mieszanki S5F5. Mieszanka betonowa S5F10 osiąga po 28 dniach twardnienia wytrzymałość na rozciąganie równą 5,94 MPa, a wyniki przedstawiono na rys. 9. Zmiany wytrzymałości na zginanie są zgodne z tendencjami dla wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, przy czym S5F5 i S5F10 wykazują znacznie lepszą wytrzymałość na zginanie, niż pozostałe próbki. Na podstawie tych badań właściwości mechaniczne stwierdzono, że kombinacja 10% pyłu krzemionkowego i 5% popiołu lotnego dała lepszy beton, co przypisuje się reakcji pucolanowej zastosowanych dodatków.

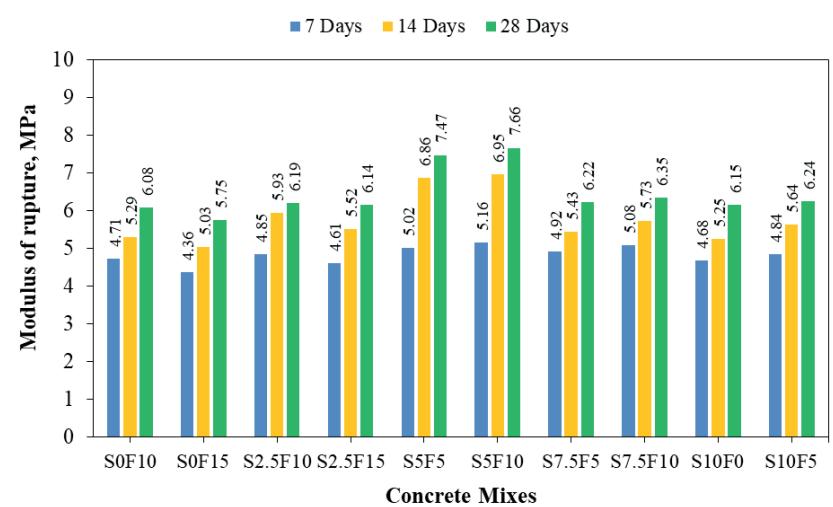
4.5. Analiza wielokrotnej liniowej regresji

Analiza liniowej wielokrotnej regresji służy do budowy równań do przewidywania zjawisk, które są zależne od więcej niż dwóch czynników niezależnych (31). Zmienna, która ma być prognozowana, nazywana jest zmienną zależną, a te, które służą do prognozowania wartości zmiennej zależnej, nazywane są zmiennymi niezależnymi. Przeprowadzono analizę regresji w celu określenia wytrzymałości na ściskanie [CS] betonu przez zmianę proporcji wartości cementu [C], pyłu krzemionkowego [SF], popiołu lotnego [Fa], kruszywa grubego [A₁, A₂, A₃, A₄], kruszywa drobnego [A₅], wody [W], domieszek [AD] i dni dojrzewania [CD]. Przeprowadzono analizę wielokrotnej regresji liniowej [MLR] w celu uzyskania korelacji projektu mieszanki – równanie [1].

$$CS = \log a + b \log CD + c \log C + d \log SF + e \log (FA + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) + f \log W + g \log AD \quad [1]$$



Rys. 8. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów ze spoiw mieszanych
Fig. 8. Split tensile strength development for different concrete mixes



Rys. 9. Wytrzymałość na zginanie betonów ze spoiw mieszanych
Fig. 9. Modulus of rupture for different concrete mixes

4.5. Multi linear regression analysis

The multiple linear regression analysis is used to build equations to predict phenomena, which are dependent of more than two independent factors (31). The variable which is to be forecasted is called the dependent variable, and those which are used to forecast the value of the dependent variable, are called the independent variables. The regression analysis was carried out to determine the compressive strength [CS] of the concrete by varying the proportions of cement content [C], silica fume [SF], fly ash [Fa], coarse aggregate [A₁, A₂, A₃, A₄], fine aggregate [A₅], water [W], admixtures [AD], and curing days (CD). Multiple linear regression [MLR] analysis was performed to obtain the mix design correlation – Eq. [1].

$$CS = \log a + b \log CD + c \log C + d \log SF + e \log (FA + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) + f \log W + g \log AD \quad [1]$$

where CS is the dependent variable, C, SF, Fa, A₁, A₂, A₃, A₄, A₅, W, and AD are the independent variables, and a, b, c, d, e, f, g are the regression coefficients.

Tablica 6 / Table 6

ZNORMALIZOWANE PARAMETRY WEJŚCIOWE DLA WIELOCZYNNIKOWEJ ANALIZY REGRESJI

NORMALIZED INPUT PARAMETERS FOR MULTI LINEAR REGRESSION ANALYSIS

Mieszanka / Mix	C	SF	FA	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	W	AD	CD	CS
S0F10	0.443	0.010	0.492	0.188	0.283	0.202	0.449	0.751	0.134	0.344	0.07	0.478
	0.443	0.010	0.492	0.188	0.283	0.202	0.449	0.751	0.134	0.344	0.14	0.543
	0.443	0.010	0.492	0.188	0.283	0.202	0.449	0.751	0.134	0.344	0.28	0.638
S0F15	0.418	0.010	0.738	0.188	0.282	0.201	0.447	0.748	0.134	0.256	0.07	0.441
	0.418	0.010	0.738	0.188	0.282	0.201	0.447	0.748	0.134	0.256	0.14	0.514
	0.418	0.010	0.738	0.188	0.282	0.201	0.447	0.748	0.134	0.256	0.28	0.599
S2.5F10	0.430	0.123	0.492	0.188	0.282	0.202	0.448	0.749	0.134	0.295	0.07	0.498
	0.430	0.123	0.492	0.188	0.282	0.202	0.448	0.749	0.134	0.295	0.14	0.586
	0.430	0.123	0.492	0.188	0.282	0.202	0.448	0.749	0.134	0.295	0.28	0.654
S2.5F15	0.406	0.123	0.738	0.187	0.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.246	0.07	0.467
	0.406	0.123	0.738	0.187	0.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.246	0.14	0.564
	0.406	0.123	0.738	0.187	0.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.246	0.28	0.648
S5F5	0.443	0.246	0.246	0.188	0.283	0.202	0.448	0.750	0.134	0.393	0.07	0.512
	0.443	0.246	0.246	0.188	0.283	0.202	0.448	0.750	0.134	0.393	0.14	0.570
	0.443	0.246	0.246	0.188	0.283	0.202	0.448	0.750	0.134	0.393	0.28	0.698
S5F10	0.418	0.246	0.492	0.188	0.281	0.201	0.446	0.747	0.134	0.359	0.07	0.528
	0.418	0.246	0.492	0.188	0.281	0.201	0.446	0.747	0.134	0.359	0.14	0.588
	0.418	0.246	0.492	0.188	0.281	0.201	0.446	0.747	0.134	0.359	0.28	0.716
S7.5F5	0.430	0.369	0.246	0.187	0.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.639	0.07	0.501
	0.430	0.369	0.246	0.187	0.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.639	0.14	0.560
	0.430	0.369	0.246	0.187	0.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.639	0.28	0.658
S7.5F10	0.406	0.369	0.492	0.187	0.280	0.200	0.444	0.743	0.134	0.580	0.07	0.519
	0.406	0.369	0.492	0.187	0.280	0.200	0.444	0.743	0.134	0.580	0.14	0.596
	0.406	0.369	0.492	0.187	0.280	0.200	0.444	0.743	0.134	0.580	0.28	0.675
S10F0	0.443	0.492	0.010	0.188	0.282	0.201	0.448	0.749	0.134	0.531	0.07	0.486
	0.443	0.492	0.010	0.188	0.282	0.201	0.448	0.749	0.134	0.531	0.14	0.539
	0.443	0.492	0.010	0.188	0.282	0.201	0.448	0.749	0.134	0.531	0.28	0.649
S10F5	0.418	0.492	0.246	0.187	.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.492	0.07	0.510
	0.418	0.492	0.246	0.187	0.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.492	0.14	0.585
	0.418	0.492	0.246	0.187	0.281	0.201	0.446	0.746	0.134	0.492	0.28	0.661

gdzie CS jest zmienną zależną, C, SF, F, A₁, A₂, A₃, A₄, A₅, W i AD są zmiennymi niezależnymi, natomiast a, b, c, d, e, f, g są współczynnikami regresji.

Realny wpływ czynników na wytrzymałość betonu na ściskanie określono dla trzydziestu różnych kombinacji. Uzyskane dane doświadczalne zostały znormalizowane w celu przeprowadzenia analizy regresji na uzyskanych danych z minimalnymi błędami standardowymi. Normalizacja parametrów wejściowych ma ogromny wpływ na wyniki i znaczne zmniejszenie błędów standardowych. Znormalizowane parametry wejściowe przedstawiono w tablicy 6.

Na podstawie zaproponowanej funkcji wykładniczej, oprogramowanie SPSS przeprowadziło kilka iteracji, co było pomocne w zmniejszeniu liczbę błędów poszczególnych niewiadomych. Wynika z niego, że resztowa suma kwadratów [R²] podczas analizy została odnotowana jako 95,574, a błąd standardowy uzyskany

The real-time influence of the factors on the compressive strength of the concrete was determined with thirty different combinations. The experimental data obtained were normalized to perform a regression analysis on the given data with minimum standard errors. Normalization of input parameters has a huge impact on the results and a considerable reduction in standard errors. The normalized input parameters are shown in Table 6.

Based on the proposed exponential function on the linear regres-

Tablica 7 / Table 7

WSPÓŁCZYNNIKI REGRESJI

REGRESSION COEFFICIENTS

a	b	c	d	e	f	g
1	0.208	1.384	0.051	0.783	-0.274	0.07

Tablica 8 / Table 8

PORÓWNANIE WARTOŚCI OBLCZONYCH W OPACIU O ANALIZĘ REGRESJI I ZMIERZONYCH DOŚWIADCZALNIE

COMPARISON OF COMPRESSIVE STRENGTH ACTUAL VS. PREDICTED

Mieszanka Mix	Czas dojrzewania, dni Curing, days	Zmierzona wytrzymałość na ściskanie Actual compressive strength (A), MPa	Obliczona wytrzymałość na ściskanie Predicted compressive strength (P), MPa	Różnica pomiędzy wytrzymałością zmierzoną i obliczoną Difference between compressive strength (A-P), MPa	Stosunek wytrzymałości zmierzonej do obliczonej The ratio of compressive strength, A/P, -
S0F10	7	47.84	46.45	1.38	1.03
	14	54.31	53.66	0.65	1.01
	28	63.77	61.98	1.79	1.03
S0F15	7	44.07	45.33	-1.26	0.97
	14	51.36	52.36	-1.00	0.98
	28	59.89	60.48	-0.59	0.99
S2.5F10	7	49.84	50.18	-0.34	0.99
	14	58.59	57.96	0.63	1.01
	28	65.42	66.95	-1.53	0.98
S2.5F15	7	46.74	49.23	-2.50	0.95
	14	56.43	56.87	-0.44	0.99
	28	64.78	65.69	-0.91	0.99
S5F5	7	51.23	50.64	0.59	1.01
	14	57.00	58.49	-1.49	0.97
	28	69.80	67.57	2.23	1.03
S5F10	7	52.83	50.53	2.30	1.05
	14	58.84	58.37	0.48	1.01
	28	71.55	67.42	4.13	1.06
S7.5F5	7	50.09	51.24	-1.15	0.98
	14	56.04	59.19	-3.15	0.95
	28	65.79	68.36	-2.57	0.96
S7.5F10	7	51.89	51.02	0.87	1.02
	14	59.64	58.93	0.71	1.01
	28	67.50	68.07	-0.57	0.99
S10F0	7	48.60	48.78	-0.18	1.00
	14	53.89	56.34	-2.45	0.96
	28	64.86	65.08	-0.22	1.00
S10F5	7	51.03	49.03	2.00	1.04
	14	58.52	56.63	1.89	1.03
	28	66.06	65.42	0.64	1.01

dla każdej zmiennej wyniósł 0. W tablicy 7 przedstawiono współczynniki regresji zarejestrowane podczas analizy MLR.

W oparciu o analizę regresji na zaproponowanym równaniu dokonano analizy i wyznaczono wyniki wytrzymałości na ściskanie. Obserwowane wyniki pozbawiono normalizacji i porównano z rzeczywistymi wynikami uzyskanymi dla poszczególnych betonów. Porównanie rzeczywistych i przewidywanych wytrzymałości na ściskanie podano w tablicy 8. Ze stosunku wyników rzeczywistych do przewidywanych stwierdzono odchylenie standardowe wynoszące 0,02854. Na rys. 10 przedstawiono różnicę wytrzymałości rzeczywistej i przewidywanej dla odpowiedniego zestawu wyników i stwierdzono wartość R² równą 0,9484.

sion analysis, the SPSS software itself runs several iterations which could be helpful to reduce the number of errors, on the individual parameters. It shows that the residual sum of squares [R²] during the analysis was observed as 95.574 and the standard error observed on each variable was 0. Table 7 shows the regression coefficients, recorded during the MLR analysis.

The analysis was done based on the regression analysis on the proposed equation, and the compressive strength results, were determined. The observed results are denormalized and compared with the actual results obtained for the respective concretes. The comparison between actual and predicted compressive strength values, were given in Table 8. From the ratio of actual vs. predic-

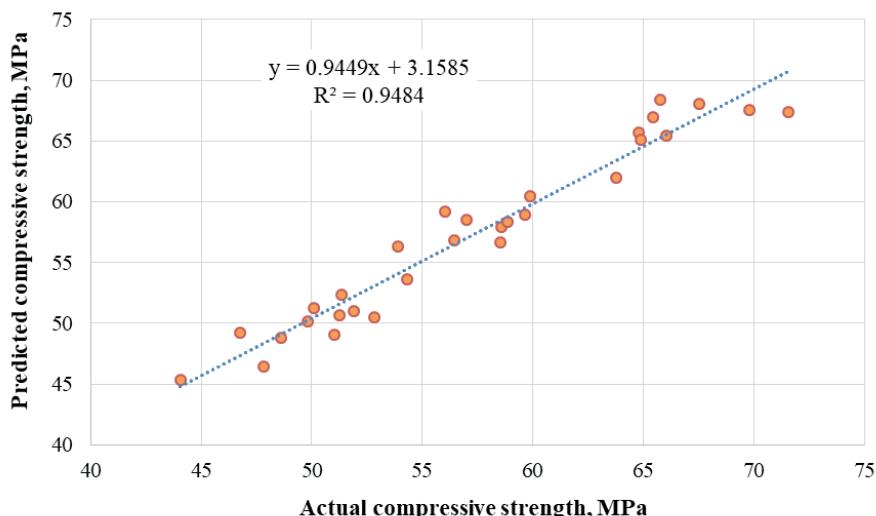
5. Wnioski

Przeprowadzono analizę trójskładnikowych mieszanek betonowych wykonanych z cementu, popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego, dla betonu klasy M65. W oparciu o uzyskane wyniki i przeprowadzone symulacje, wyciągnięto poniższe wnioski.

1. Zwiększenie dodatku PCE po osiągnięciu optymalnego dodatku powodowało wyciek mleczka cementowego, z zaczynu. Czas rozpływów przy optymalnym dodatku wzrastał wraz ze wzrostem procentowym udziału popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego. Średnica rozpływów przy optymalnym dodatku malała wraz ze wzrostem udziału popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego.
2. Urabialność betonu poprawia się wraz ze zwiększeniem dodatku pyłu krzemionkowego, a maleje wraz ze wzrostem dodatku popiołu lotnego.
3. Stwardniały beton miał największą wytrzymałość na ściskanie, na rozciąganie przy rozluupywaniu oraz na zginanie, spełniając wymogi betonu klasy M65, przy 15% zastąpieniu cementu, przez co najmniej 5% pyłu krzemionkowego oraz popiołu lotnego.
4. Z trzydziestu różnych kombinacji 7 zmiennych wejściowych otrzymano model regresji wielokrotnej, który może przewidywać wytrzymałość na ściskanie mieszańek trójskładnikowych, dla różnych proporcji składników. Równanie wykazało duży współczynnik korelacji [R^2] wynoszący 0,9484, pomiędzy wynikami rzeczywistymi i przewidywanymi.

Literatura / References

1. C. Deepa, K. SathiyaKumari, V.P. Sudha, Prediction of the compressive strength of high performance concrete mix using tree based modeling. *Int. J. Comput. Appl.* **6**(5), 18-24 (2010). <https://doi.org/10.5120/1076-1406>
2. Indian standards guidelines to concrete mix proportioning, IS 10262 (2019), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
3. C. Sudha, K. Divya Krishnan, P.T. Ravichandran, P.R. Kannan Rajkumar, Strength Characteristics of high strength concrete using M-sand, *Indian J. Sci. Technol.* **9**(41) (2016). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i41/95864>
4. A.K.H. Kwan, L.G. Li, W.W.S. Fung, Wet packing of blended fine and coarse aggregate, *Mater. Struct.* **45**(6) 817-828 (2012). <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9800-3>
5. L.G. Li, A.K.H. Kwan, Packing density of concrete mix under dry and wet conditions, *Powder Technol.* **253**, 514-521 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.12.020>
6. H.M.B. Miranda, F.A. Batista, M. de Lurdes Antunes, J. Neves, Influence of laboratory aggregate compaction method on the particle packing of stone mastic asphalt, *Constr. Build. Mater.* **259**, 119699 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119699>



Rys. 10. Porównanie wytrzymałości na ściskanie obliczonej z regresji oraz wyznaczonej doświadczalnie

Fig. 10. Comparison of actual vs. predicted compressive strength

ted results, the standard deviation of 0.02854, was observed. Fig 10 shows the difference in actual and predicted strength for the respective set of results and an R^2 value of 0.9484 was obtained.

5. Conclusions

Overall analysis was carried out on the ternary blends of OPC, fly ash, and silica fume, for the corresponding M65 grade concrete. Based on the results obtained and the simulations carried out, the following conclusions were drawn.

1. The increase of PCE after the attainment of optimum dosage caused bleeding in the cementitious paste. The flow time of optimum dosage increased when the percentage of fly ash and silica fume increased. The spread diameter of optimum dosage decreased when the percentage of fly ash and silica fume increased.
2. The workability of the concrete increases with the increase of silica fume and decreases with an increase in fly ash content.
3. The hardened concrete specimen had the highest compressive strength, split tensile strength, and modulus of rupture, satisfying M65 concrete for 15% replacement of cement with at least 5% silica fume and fly ash.
4. From the thirty different combinations of 7 input variables, a multi-linear regression model, which can predict the compressive strength of ternary blended mixes for varying proportions of ingredients, was obtained. The equation showed a higher correlation coefficient with R^2 of 0.9484, between the actual and predicted results.

7. A. Ajay, K.P. Ramaswamy, M. Nazeer, A study on compatibility of superplasticizers with high strength blended cement paste, IOP Conf. Earth Environ. Sci. **491**(1), 012043 (2020). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/491/1/012043>
8. C. Jayasree, R. Gettu, Experimental study of the flow behaviour of superplasticized cement paste, Mater. Struct. **41**(9), 1581-1593 (2008). <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9350-5>
9. I. B. Muhit, S.S. Ahmed, M.M. Amin, M.T. Raihan, Effects of silica fume and fly ash as partial replacement of cement on water permeability and strength of high-performance concrete. 4th Int. Conf. Adv. Civil Eng. AE-TACE, Association of Civil and Environmental Engineers, (2013).
10. N.K. Verma, Influence of partial replacement of cement by industrial waste on properties of concrete, Recent Trends in Civil Engineering. Lect. Notes Civ. Eng. **77**, 693-713 (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-15-5195-6_54
11. T. Nochaiya, W. Wongkeo, A. Chaipanich, Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. Fuel, **89**(3), 768-774 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.003>
12. V. Prakash, K. Chandrasekar, P. Vinoth, Partial replacement of silica fume and fly ash in pervious concrete, Int. J. Eng. Res. Technol., **5**(5), 1823-1825 (2018).
13. U.S. Ansari, I.M. Chaudhri, N.P. Ghuge, R.R. Phatangre, High performance concrete with partial replacement of cement by alccofine and fly ash. Indian Res. Trans. **5**(2), 19-23 (2015).
14. J. Snehavi, A. Yashwanth, Experimental study on partial replacement of cement by fly ash, silica fume and sand with quarry dust. Int. J. Sci. Res. **7**(5), 582-585 (2018).
15. A.S. Adithya Saran, P. Magudeswaran, SEM analysis on sustainable high performance concrete, Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Techn. **6**(6), 10237-10246 (2017). <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2017.0606016>
16. M.K. Rao, C.N.S. Kumar, Influence of fly ash on hydration compounds of high-volume fly ash concrete. AIMS Mater. Sci. **8**(2), 301-320 (2021). <https://doi.org/10.3934/matersci.2021020>
17. D. Maruthachalam, R.K. Rajalaxmi, B.G. Vishnuram, Statistical modeling of fiber reinforced high performance concrete. Int. J. Sci. Eng. Res. **3**(6), 1-5 (2012).
18. F. Khademi, S.M. Jamal, N. Deshpande, S. Londhe, Predicting strength of recycled aggregate concrete using artificial neural network, adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple linear regression. Int. J. Sustain. Built Env. **5**(2), 355-369 (2016).
19. N. Deshpande, S. Londhe, S. Kulkarni, Modeling compressive strength of recycled aggregate concrete by artificial neural network, model tree and non-linear regression. Int. J. Sustain. Built Env. **3**(2), 187-198 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.12.002>
20. I. Padmanaban, S. Kandasamy, S.C. Natesan, Statistical modeling of high and low volume of fly ash compressive strength concrete, Int. J. Appl. Eng. Res. **4**(7), 1161-1167 (2009).
21. D. Sathyan, A.K. Balakrishnan, S.M. Mohandas, Temperature influence on rheology of superplasticized pozzolana cement and modeling using RKS algorithm,. J. Mater. Civil Eng. **30**(9), 04018221 (2018). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002406](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002406)
22. C.W. Chase, Demand-driven forecasting: a structured approach to forecasting, 2 ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2013.
23. S. Charhate, M. Subhedar, N. Adsul, Prediction of concrete properties using multiple linear regression and artificial neural network. J. Soft Comput. Civ. Eng. **2**(3), 27-38 (2018).
24. M.F.M. Zain, S.M. Abd, Multiple regression model for compressive strength prediction of high performance concrete. J. Appl. Sci. **9**(1), 155-160 (2009). <https://doi.org/10.3923/jas.2009.155.160>
25. Indian standards specification on ordinary portland cement – 53 Grade, IS 12269 (2013), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
26. Indian standards specification on silica fume, IS 15388 (2003), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
27. Indian standards specification on pulverized fuel ash, IS 3812 (2003), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
28. Indian standard specification on coarse and fine aggregate for concrete, IS 383 (2016), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
29. Indian standard specification on concrete admixture, IS 9103 (1999), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
30. Indian standard code of practice for plain and reinforced concrete, IS 456 (2000), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
31. The user manual SPSS, https://www.westga.edu/academics/research/vrc/assets/docs/spss_basics.pdf
32. Indian standard code of practice for methods of test for aggregates for concrete, IS 2386-3 (1963), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
33. Indian standard code of practice for methods of sampling and analysis of concrete, IS 1199 (1959), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
34. Indian standard code of practice for methods of tests for strength of concrete, IS 516 (1959), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
35. Indian standard code of practice for splitting tensile strength of concrete - Method of test, IS 5816 (1999), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
36. Indian standard code of practice for specification for apparatus for flexural testing of concrete, IS 9399 (1979), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India