

Właściwości fizyczne betonów lekkich zawierających polistyren

Physical properties of polystyrene lightweight concrete

1. Wstęp

Beton jest najpowszechniej stosowanym materiałem budowlanym na świecie. Mały koszt produkcji, łatwość stosowania oraz dobre właściwości mechaniczne skłaniają do szerokiego stosowania w budownictwie. W ostatnich latach wielu badaczy prowadziło badania poświęcone wykorzystaniu betonów lekkich w budownictwie. Zastosowanie betonów lekkich w infrastrukturze drogowej i kolejowej przedstawił Bagon i in. (1). Uwzględniając szybki rozwój budynków o znacznych wysokościach, obiektów wielkogabarytowych oraz o dużych rozpiętościach przęseł, betony lekkie będą znajdować coraz szersze zastosowanie. W porównaniu do tradycyjnych betonów, betony lekkie mają mniejszą gęstość, posiadają lepsze właściwości izolacyjne i odporność na udar. Stosowanie betonów lekkich w budownictwie zmniejsza masę oraz koszty wykonania obiektu, jednak uzyskiwane wytrzymałości nie są satysfakcjonujące z punktu widzenia nośności i stateczności obiektu, co ogranicza zastosowanie takich betonów w elementach nośnych. Obecnie trwają prace nad możliwością wytwarzania betonów o lepszych właściwościach mechanicznych i niższej gęstości, mogących sprostać wymaganiom konstrukcyjnym budynków. Betony lekkie jako elementy konstrukcyjne co obniża masę budynków i znacznie zmniejsza efektywną siłę trzęsienia ziemi, a w konsekwencji zmniejsza szkody przez nie wywołane. Podstawowym rozwiązaniem umożliwiającym wykonanie elementów konstrukcyjnych z betonu lekkiego jest użycie do jego produkcji lekkich kruszyw pochodzenia mineralnego lub przemysłowego w miejsce tradycyjnie stosowanych. Pozwala to na zachowanie odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie pomimo spadku gęstości.

Li i in. (2) badali właściwości mechaniczne betonów lekkich zawierających kruszywo polistyrenowe. Zaproponowali oni kilka rozwiązań mających na celu zmniejszenie wad badanego materiału. Autorzy badali gęstość, wytrzymałość na ściskanie, wyznaczali współczynnik naprężenie-odkształcenie dla betonu lekkiego oraz

1. Introduction

Concrete is the most consumed material in the world. Low production price, being easily applicable and desirable mechanical properties have been made it a preferable material in the building industry. In the last decades many researchers concentrated on using concrete with lightweight aggregate in buildings. Applications of lightweight concrete in road infrastructure and railways subgrade have been reported (1). Regarding rapid development of high buildings and concrete structures with large dimension and long spans, lightweight concrete application has been popularized. Compared to common concrete, it has lower density, better insulation and energy absorption. Lightweight concrete can decrease weight and building construction cost, but its strength do not satisfy the minimum strength required as a structural member so it could not be used as a load-bearing and structural member. Nowadays researches mostly are aimed at manufacturing a concrete with better properties and lower density, so it could be used as a structural member and a load-bearing structure. Lightweight concrete as structural members with decreasing weight of buildings considerably reduces effective earthquake force on buildings and subsequently the damage to them. The main solution to make a structural lightweight concrete is application of lightweight mineral and industrial aggregates instead of usual aggregates so the compressive strength could be preserve as the density reduce.

Li et al (2) tested mechanical properties of lightweight concrete containing polystyrene aggregates and some solutions have been proposed to solve the defects. In this research, density, compressive strength and stress-strain behavior of lightweight concrete has been investigated and the most efficient mixture design with polystyrene aggregates has been presented. These results showed compressive strength and water to cement ratio of lightweight concrete affected greatly by the amount of polystyrene aggregates. They showed the main problem of this type of lightweight concrete is the segregation of polystyrene aggregates from concrete

zaprezentowali najbardziej efektywny skład betonu zawierającego kruszywo polistyrenowe. Wyniki dowiodły, że wytrzymałość na ściskanie oraz współczynnik wodno-cementowy zależą w dużym stopniu od ilości kruszywa polistyrenowego. Autorzy wykazali, że główny problem z tego typu betonem polega na segregacji kruszywa polistyrenowego w matrycy cementowej ale można temu zapobiec poprzez odpowiednie formowanie. Madandoust i in. (3) badali właściwości świeżej mieszanki z betonu lekkiego samozageszczalnego, zawierającego polistyren. Badano rozptył mieszanki betonowej, przepływanie w L-pojemniku, czas T_{500} oraz czas wypływu z V-lejka. Wyniki badań dowiodły, że mieszanki o dużej gęstości generalnie spełniają kryteria betonów samozageszczalnych. Chen i inni (4) badali wpływ superplastyfikatorów na urabialność betonów lekkich zawierających kruszywo polistyrenowe. Badali także wpływ warunków dojrzewania oraz stosunku superplastyfikator-cement na wytrzymałość na zginanie lekkich betonów zawierających kruszywo polistyrenowe. Wyniki ich badań dowiodły, że wytrzymałość lekkiego betonu polistyrenowego zawierającego superplastyfikator zależy w dużym stopniu od warunków dojrzewania. Dowiedziono również, że użycie superplastyfikatora powoduje zwiększenie wytrzymałości na zginanie badanych betonów. Babu i in. (5) badali wpływ wielkości kruszywa polistyrenowego oraz wpływ wilgotności na właściwości betonu. Wyniki tych badań dowiodły, że betony zawierające kruszywo polistyrenowe o drobniejszym uziarnieniu mają większe wytrzymałości na ściskanie niż te wykonane z kruszyw grubszych. Wyniki badań wykazują, że użycie kruszywa polistyrenowego korzystnie wpływa na zmiany wilgotności betonu spowodowane nasiąkliwością i parowaniem. Miled i in. (6) badali wytrzymałość lekkiego betonu polistyrenowego oraz wpływ rozmiaru kruszywa na sposób zniszczenia betonu. Wyniki badań dowiodły, że wielkość ziaren kruszywa wpływa na wytrzymałość na ściskanie. Było to bardziej zauważalne w betonach o małej porowatości, podczas gdy dla betonów bardziej porowatych efekt ten był zaniedbywalny. Dzięki ocenie przełamów kostek betonowych, autorzy zaproponowali nowy model pęknięcia pozwalający przewidzieć wytrzymałość na ściskanie lekkiego betonu polistyrenowego zawierającego kruszywo różnych rozmiarów. Tang i in. (7) badali właściwości mechaniczne oraz skurcz lekkich betonów polistyrenowych i dowiedli, że lekkie betony z polistyrenem mają odpowiednią plastyczność, jednak ze względu na niską wytrzymałość nie mogą być stosowane jako element konstrukcyjny. Autorzy wykonali i zbadali lekkie betony o gęstościach z przedziału 1400-2100 kg/m³ zawierające kruszywo polistyrenowe. Wyniki ich badań wykazują, że gęstość i moduł sprężystości zależą od rozmiaru i rodzaju kruszywa polistyrenowego. Bagon i in. (1) porównywali lekki beton polistyrenowy i perlitobeton zastosowane do budowy konstrukcji pływających. Wyniki tych badań dowiodły, że w porównaniu do perlitobetonu o tej samej gęstości właściwej, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie oraz moduł rozerwania lekkiego betonu polistyrenowego są większe odpowiednio o 50%, 100% i 25%. Ray i inni (8) projektowali mieszanki i badali właściwości mechaniczne betonów o bardzo małej gęstości. Autorzy stosowali kruszywo polistyrenowe jako składnik betonów lekkich i dowiedli, że użycie drobniejszego kruszywa zapewnia uzyskanie większej wytrzyma-

matrix and this could be prevented by molding. Madandoust et al (3) investigated the properties of lightweight self-compacting expanded polystyrene (EPS) concrete in the fresh stage. This study used methods like the slump flow, L-box, T_{500} and V-funnel test. The tests result showed mixture design with high density generally meet the criterion of self-compacting concrete. Chen et al (4) studied the effect of superplasticizers on the workability of lightweight EPS concrete. They also investigated the effect of curing conditions and superplasticizer to cement ratio on bending strength of lightweight EPS concrete. The result of this study showed that the strength of lightweight EPS concrete containing superplasticizers greatly depends on curing condition. It was also revealed, that using superplasticizers, bending strength of lightweight concrete can be improved. Babu et al (5) studied the effect of size of the polystyrene aggregates and humidity characteristics on lightweight concrete. This study showed that the compressive strength of concrete containing smaller sizes of polystyrene aggregates is more than concrete containing larger sizes of polystyrene aggregates. These researchers showed that using EPS make the humidity characteristics like absorption and evaporation more desirable. Miled et al (6) investigated compressive behavior of concrete containing EPS aggregate and size effect of polystyrene on the fracture mode of concrete. The results of the study showed that the size of EPS aggregate affects the compressive strength. It was also shown that this affects less porous concrete further, in a way that it is negligible in more porous concrete. By fracture mode examination, a new model was proposed for predicting compressive strength of lightweight EPS concrete with different aggregates sizes. Tang et al. (7) tested mechanical properties and shrinkage of lightweight EPS concrete, they showed polystyrene lightweight concrete have adequate ductility but due to low strength it could not be used as a structural member. With using polystyrene aggregates they manufactured and tested a lightweight concrete with density range of 1400 - 2100 kg/m³. This research results showed that density and modulus of elasticity greatly depends on sizes and types of the polystyrene aggregates. Bagon et al (1) investigated the use of lightweight concrete in marine vessels in comparison with perlite concrete. This research showed that compare to perlite concrete for a specific density, compressive strength, modulus of elasticity and modulus of rupture of EPS concrete are higher by 50%, 100% and 25% respectively. Ray et al (8) investigated mixture design and mechanical properties of concrete with very low density. They used polystyrene aggregates to lightweight concrete production and showed that using smaller sizes of EPS results in higher compressive strength. Perry et al (9) studied mixture designs and behavior of EPS concrete. They tested concrete containing polystyrene with volumetric percentage of 40, 50, and 60. The strength and density of samples were measured and the stress-strain relationships of lightweight EPS concrete have been investigated. Bischoff et al (10) investigated the behavior of EPS concrete under hard impact. In this research, impacts on concrete were made by a hammer freefall from a specific height. Samples were made and tested in three groups with the range of compressive strength from 4 to 12 MPa. These results were compared to the static penetration test. Destruction

łości. Perry i in. (9) projektowali mieszanki i badali zachowanie betonu zawierającego kruszywo polistyrenowe. Badali beton, w których zawartość kruszywa polistyrenowego wynosiła 40, 50 i 60% objętości. Oceniali wytrzymałość na ściskanie, gęstość oraz wyznaczali współczynnik naprężenie-odkształcenie. Bischoff i in. (10) badali udarność betonu z polistyrenem. W badaniu wykorzystywano młotek swobodnie spadający z określonej wysokości. Próbkę wykonano i badano w trzech grupach, z wytrzymałościami w zakresie 4 MPa -12 MPa. Wyniki porównywano do statycznej próby penetracji. Zniszczenie próbek zachodziło w strefie zgniatania pod wpływem uderzenia. W wyniku badania okazało się, że ten typ betonu ma małą odporność na pęknięcie. Babu i inni (11) badali zachowanie lekkich betonów polistyrenowych z dodatkiem mikrokrzemionki. Autorzy używali kruszywa polistyrenowego jako lekkiego wypełniacza oraz mikrokrzemionki jako aktywnego składnika betonu. Zaprojektowany beton polistyrenowy poddawano ocenie wytrzymałości, urabialności i trwałości. Wyniki badań dowiodły, że wytrzymałość betonu wzrasta wraz ze zwiększającym się udziałem pyłu krzemionkowego.

Niniejsza praca poświęcona jest badaniom lekkiego betonu polistyrenowego pod kątem wytrzymałości na ściskanie, stosunku naprężenie-odkształcenie, modułu sprężystości, odporności ogniowej oraz udarności.

2. Metody badań i materiały

2.1. Materiały

2.1.1. Kruszywo polistyrenowe

W badaniach stosowano rozdrobniony polistyren jako kruszywo do produkcji lekkich betonów. Granulki były kuliste, o śliskiej powierzchni. Otrzymywano je poprzez kruszenie dużego bloku. W badaniach stosowano trzy frakcje granул, ich właściwości przedstawiono w tabelicy 1.

2.1.2. Cement i pył krzemionkowy

W badaniach użyto cementu portlandzkiego typu 2 zgodnie z irańską normą 389 ISIRI. Gęstość cementu wynosiła 3,15 g/cm³. Cement typu 2 według 389 ISIRI stosowany jest w betonach, od których wymagane jest małe ciepło hydratacji oraz umiarkowana odporność na korozję siarczanową. Beton z tego cementu może być stosowany w środowisku wodnym lub lądowym, przy umiarkowanym stężeniu jonów siarczanowych [zgodnie z irańską normą betonową „Abba”, w środowisku wodnym stężenie jonów siarczanowych mniejsze niż 1200 ppm, a w wodach gruntowych mniejsze niż 0,5%]. Dodatkowo zastosowano mikrokrzemionkę w celu polepszenia właściwości oraz zwiększenia wytrzymałości. Mikrokrzemionka w postaci zawiesiny wyprodukował krajowy producent [FABIR Co] i zawierała mieszaninę mikrokrzemionki oraz superplastyfikatora. Mikrokrzemionkę dostarczył w postaci sztywnego żelu, który po zmieszaniu stawał się lepką cieczą. Miał szary kolor i gęstość właściwą równą 1,3 g/cm³. Ze względu na dodatek mikrokrzemionki zastosowano superplastyfikator, który umożliwił

of samples initiated from crushing zone under the impact and it is revealed that this type of concrete has low crushing resistance. Babu et al. (11) investigated the behavior of lightweight concrete containing EPS and micro-silica. They applied EPS as a lightweight aggregates and micro-silica as cement supplementary material. Strength, workability and durability of the lightweight concrete containing polystyrene have been investigated. The results showed that concrete strength increases as micro-silica usage percentage increases.

In current laboratorial study, lightweight concrete containing polystyrene aggregates have been tested for compressive strength, stress-strain relation, modulus of elasticity, fire resistance and impact resistance.

2. Materials and methods

2.1. Materials

2.1.1. Polystyrene aggregate

In the current study, ground polystyrene has been used for lightweight concrete production. Granules of manufactured polystyrene aggregate were greasy and sphere in shape. Lightweight aggregate was produced by crushing blocks of polystyrene. In this study three fractions of granule which are categorized in Table 1, have been used.

2.1.2. Cement and micro-silica

In the current research, Portland cement type 2 has been applied. This cement is produced according to the National Standards No. 389 ISIRI of Iran (13) with density of 3150 kg/m³.

Portland cement type 2 is used for concretes that moderate heat of hydration is essential and sulfate attack is moderate. This cement can be used in all concrete factors and it is applicable in soil and water environments, that the sulfate ions concentration is moderate [according to Iranian concrete regulation “Abba”, for the average ambient conditions in water environments that the sulfate ions concentration is less than 1200 ppm and in the earth environment that is less than 0.5 %]. In addition, micro-silica has been used as supplementary material to cement for reaching higher level of strength and properties. Micro-silica gels were produced by a domestic manufacturer [FABIR Co] and included mixed micro-silica gel and ultra-plasticizers. In terms of physical properties, it

TABLICA 1 / TABLE 1

WŁAŚCIWOŚCI UŻYTEGO KRUSZYWA POLISTYRENEWEGO
PROPERTIES OF POLYSTYRENE AGGREGATES USED

Symbol	Diameter, Średnica, mm	Density, Gęstość, kg/m ³
S	≤ 4	15
M	4 - 6	15
L	≥ 6	15

zwiększenie ciekłości mieszanki betonowej oraz zmniejszenie stosunku wodno-cementowego. W badaniach używano podwójnie płukanego piasku rzecznoego o krzywej uziarnienia zgodnej ze specyfikacją ACI. Wskaźnik miakkości oraz ciężar nasypowy piasku wynosiły odpowiednio 2,8 i 1800 kg/m³.

2.2. Metody badań

Wytrzymałość na ściskanie określano zgodnie w normą ASTM C39/39M na próbkach 7 i 28 dniowych. W pierwszej kolejności przygotowano próbki betonów lekkich o różnych gęstościach. Udział cementu w składzie betonu był stały i wynosił 400 kg/m³. Mieszanki miały stały współczynnik wodno-cementowy wynoszący 0,4. Pierwszą zmienną w składzie betonów była wielkość ziaren kruszywa. Drugą zmienną był udział objętościowy kruszywa w składzie betonu i jego wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Trzecią zmienną był dodatek mikrokrzemionki do mieszanki betonowej. Następnie badano odporność ogniową oraz udarność na próbkach o tej samej gęstości. W sumie przygotowano i zbadano 99 próbek: 90 kostek sześciennych o wymiarach 150 mm, przeznaczonych do badań wytrzymałości, 6 próbek walców o średnicy 150 mm i wysokości 64 mm przeznaczonych do badań odporności na uderzenia i 3 próbki o wymiarach 150x150x64 mm do badań odporności ogniowej. Jak wspomniano na początku wykonano betony o czterech różnych gęstościach 500 kg/m³, 750 kg/m³, 1000 kg/m³ i 1500 kg/m³, zawierające trzy różne wielkości ziaren: drobne, średnie i grube [tablica 1]. Dla każdej gęstości i odpowiedniej frakcji kruszywa, wykonano po sześć kostek; trzy z nich badano po 7 dniach a pozostałe trzy po 28 dniach. W celu określenia wpływu mikrokrzemionki na właściwości betonów zawierających różne rodzaje kruszywa, dodawano ją do mieszanki o gęstości 750 kg/m³. Przygotowano po sześć kostek z każdego rodzaju betonu, z czego trzy badano po 7 dniach hydratacji, a pozostałe po 28 dniach. Udarność badano na próbkach betonu o gęstości 500 kg/m³, zawierających różne frakcje kruszyw polistyrenowych. Z mieszanki zawierającej odpowiednie frakcje kruszywa przygotowano po dwa walce próbki; pierwszy badano po 7 dniach hydratacji, a drugi po

TABLICA 2 / TABLE 2

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU I MIKROKRZEMIONKI
CEMENT AND MICRO-SILICA CHARACTERISTICS

Component Składnik	Cement Cement, %	Micro-Silica Mikrokrzemionka, %
SiO ₂	21.78	78.07
Al ₂ O ₃	6.56	2.22
Fe ₂ O ₃	4.13	1.57
CaO	60.12	2.95
MgO	2.08	1.27
Na ₂ O	0.36	2.89
K ₂ O	0.42	6.51
SO ₃	2.16	0.95

is in gel form when it is stationary while it turns to a viscose liquid state as soon as it is mobilized. It has a grey color with a specific weight of 1300 kg/m³

Since microsilica was used, it was unavoidable to use superplasticizers for increasing consistency of concrete and decreasing water to cement ratio. Double-washed river sand with gradation in accordance with ACI specification has been used. Modulus of fineness and specific apparent weight of sand were calculated, respectively, 2.8 and 1800 kg/m³.

2.2. Methods

Compressive strength was determined in accordance with ASTM C39/39M specifications standard with the sample age of 7 and 28-days. At first, samples of lightweight concrete with different densities have been prepared. The amount of cement dosage and ratio of water to cement are constant of 400 kg/m³ and 0.4 respectively. Then size of polystyrene aggregates was taken as the first variable in the samples. To study the volume effect of polystyrene aggregates on the compressive strength of lightweight EPS concrete was taken as the second variable so the percentage of polystyrene aggregates was varying. The next variable was silica fume content and its effect on the compressive strength of lightweight EPS concrete. Fourth and fifth variable, accordingly, were fire and impact resistance so they were tested with the same determined density and their results have been studied. Totally 99 samples were made: 90 cubic samples with dimensions of 150 mm for compressive strength test, 6 cylinder samples with diameter of 150 mm and thickness of 64 mm for impact resistance test and three samples with dimensions of 150×150×64 mm for fire resistance test. As previously mentioned, four different densities of 500 kg/m³, 750 kg/m³, 1000 kg/m³ and 1500 kg/m³ and for each density three different size of polystyrene aggregates, small, medium and large were tested [Table 1]. Furthermore for each density with specific aggregates size, six cubic samples were made which three of them were tested after 7 days and the other three remaining after 28 days. To investigate the effect of micro-silica, for each three different sizes of polystyrene aggregates, micro silica was added to lightweight concrete containing polystyrene aggregates with density of 750 kg/m³ and 6 cubic samples were made for every specific size which three of them were tested after 7 days and the other three after 28 days. Samples with density of 500 kg/m³ with different sizes of polystyrene aggregates were subjected to impact resistance test. For each size of polystyrene aggregates two cylindrical samples were made which one of them were tested after 7 days and the other one after 28 days. For fire resistance test lightweight concrete with density of 500 kg/m³ were used. For each size of aggregates, totally three samples were tested. Finally test was done in accordance with ASTM C39/39M (12) specification standard with the sample of 7 and 28-days-age.

Mixture designs are presented in Table 3. Abbreviations are as follows:

D: density

a: density of a sample in kg/m³

TABLICA 3 / TABLE 3

SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH

MIXTURE DESIGNS FOR TESTING SAMPLES

Specimen Próbka	Polystyrene volume ratio, Udział objętościowy polistyrenu, %	Sand volume ratio, Udział objętościowy piasku, %
D1500-S	35	50.78
D1500-M	35	50.78
D1500-L	35	50.78
D1000-S	50	22.22
D1000-M	50	22.22
D1000-L	50	22.22
D750-S	65	8.86
D750-M	65	8.86
D750-L	65	8.86
D500-S	80	0
D500-M	80	0
D500-L	80	0
D750-s-S	65	8.86
D750-s-M	65	8.86
D750-s-L	65	8.86

28 dniach. Badania odporności na ogień wykonano na próbkach betonu o gęstości 500 kg/m³. Sumarycznie dla każdej mieszanki zawierającej odpowiednią frakcję kruszywa badano po trzy próbki. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C39/39M (12) na próbkach po 7 i 28 dniach.

Składy mieszanek przedstawiono w tablicy 3. Oznaczenia symboli:

D: gęstość

a: gęstość próbki w kg/m³

s: indeks informujący o dodatku mikrokrzemionki [brak indeksu oznacza brak dodatku]

m: S, M lub L wielkość granул polistyrenu

c: wiek próbki w momencie badania 8 dni lub 28 dni

d: dni

Przygotowanie próbek polegało w pierwszej kolejności na wymieszaniu suchych składników: cementu, piasku i kruszywa polistyrenowego. Dopiero po dokładnym wymieszaniu dodawano wodę. W celu eliminacji pyłów, piasek płukano, a następnie ponownie zestawiano jego krzywą ziarnową. Kruszywo polistyrenowe ze względu na małą masę i ładunki elektrostatyczne wykazywało tendencje do unoszenia się w powietrzu, co mogłoby powodować niejednorodność mieszanki betonowej oraz błędne wyniki. W celu eliminacji tego niekorzystnego zjawiska granulki polistyrenowe zostały najpierw zmieszane z cementem, dzięki czemu każda granulka była wstępnie otoczona ziarnami cementu. Taka metoda neutralizowała ładunki elektryczne na ziarnach, które podczas mieszania nie ulegały aglomeracji. Wprowadzanie dodatku mikrokrzemionki również odbywało się z odpowiednią starannością mającą na celu jej równomierne rozproszczenie w całej objętości mieszanki. Po wstępnym uśrednieniu suchych składników i wprowadzeniu wody

s: indicating that mixture design of the sample contains micro-silica while sample without micro-silica don't have it as an index

m: S, M or L indicating the sizes of polystyrene aggregates

c: shows the age of the sample when it was tested, 8-days-old or 28-days-old

d: day

For making the samples, firstly cement, sand and polystyrene aggregate were mixed by a mixer and then after reaching homogeneous mixture water were added. To remove any probable dust, sand was washed, then gradation was adjusted to meet the standard gradation. Because of the lightweight of the polystyrene aggregates they tend to disperse in the air or due to the electrical charge they stick together. These would cause non-uniform dispersion and mixture of concrete so tests results would have considerable errors. To avoid this problem, they were mixed with cement before polystyrene aggregates were added to the concrete so all of its surface were covered with cement powder. This method would neutralize the electric charge of the polystyrene aggregates and they wouldn't stick together as a result while mixing. To avoid lumps of silica fume and better performance, in the samples which it was added, a special mixture design was chose. Dry materials were first mixed then water was added. Prior to first mixing of dry material and water, silica fume slurry was introduced and to reach a homogeneous mixture, mixing was continued 3 to 5 minutes. After 24 hours samples were demolded and kept in curing tank with 20 degree Celsius till the test time.

3. Results

3.1. Density

All test results showed that the most effective parameter of light-weight concrete is its density which determine others mechanical and physical properties of lightweight concrete. Because of the aforementioned reason density of 7 and 28-days-age samples were measured and its values are presented in Table 4. As it was expected, results indicate that increasing the used percentage of polystyrene results in intense fall of density values. Micro-silica doesn't considerable raise density values. Density of concrete between 7 and 28 days changed not more than 3%.

3.2. Compressive strength

Compressive strength test results are presented in Table 5. Analysis of compressive strength after 7 and 28 days showed that with increasing polystyrene content, compressive strength decrease considerably. It was also noticed, that compressive strength 7 days / 28 days ratio linearly decrease as polystyrene percentage increases. Strength fall in the presence of EPS aggregate can be related to weak midsection between polystyrene aggregates and concrete matrix. High volumetric polystyrene aggregate cause the cement paste / EPS ratio reduction. As a result the ultimate strength of concrete would be determined by polystyrene aggregate and low shear strength of these aggregates result in a sharp fall of compressive strength.

TABLICA 4 / TABLE 4

GĘSTOŚĆ BETONÓW PO 7 I 28 DNIACH

DENSITY OF CONCRETE AT THE AGES OF 7 AND 28-DAYS

Sample Próbka	Density after 7 days Gęstość po 7 dniach, kg/m ³	Average of 7d-density Średnia gęstość próbek po 7 dniach, kg/m ³	Density after 28 days Gęstość po 28 dniach, kg/m ³	Average of 28d-density Średnia gęstość próbek po 28 dniach, kg/m ³
D1500-S-28d	1645	1616	1681	1648
D1500-M-28d	1609		1615	
D1500-L-28d	1593		1647	
D1000-S-28d	1190	1183	1202	1205
D1000-M-28d	1149		1167	
D1000-L-28d	1210		1245	
D750-S-28d	910	887	886	893
D750-M-28d	834		865	
D750-L-28d	922		927	
D500-S-28d	659	680	676	691
D500-M-28d	685		700	
D500-L-28d	696		696	
D750-s-S-28d	854	842	862	849
D750-s-M-28d	814		792	
D750-s-L-28d	858		892	

mieszanie kontynuowano przez 3-5 minut, po czym zaformowano próbki. Po 24 godzinach próbki rozformowano i przetrzymywano w pojemniku w temperaturze 20°C do czasu badania.

3. Wyniki badań

3.1. Gęstość

Wyniki badań dowodzą, że gęstość jest najistotniejszą właściwością betonów lekkich i od niej uzależnione są pozostałe właściwości fizyczne. Z tego względu mierzono gęstość próbek po 7 i 28 dniach hydratacji. Wyniki przedstawiono w tablicy 4. Zgodnie z oczekiwaniem, wyniki potwierdzają, że zwiększenie udziału kruszyw polistyrenowych prowadzi do gwałtownego spadku gęstości. Dodatek mikrokrzemionki nie wpływa wyraźnie na gęstość. Różnica gęstości próbek 7 i 28 dniach, nie jest większa od 3%.

3.2. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w Tablicy 5. Analiza wytrzymałości po 7 i 28 dniach pozwala stwierdzić, że ze wzrostem zawartości granul polistyrenowych wytrzymałość na ściskanie znacznie spada. Stwierdzono również, że stosunek wytrzymałości po 7 dniach i po 28 dniach spada linowo wraz ze wzrostem zawartości polistyrenu. Spadek wytrzymałości betonów z kruszywem polistyrenowym jest spowodowane przez słabą strefę przejściową kruszywa z zaczynem. Duża objętość kruszy-

Investigations of results of sample containing micro-silica [D750-s] revealed that, the use of micro-silica reduces the compressive strength of concrete with polystyrene aggregates at the older ages. So that at the age of 7 days this reduction was low [approximately 4%], but at 28 days of age this reduction was very significant [approximately 14%].

3.3. Modulus of elasticity

According to definitions presented in ASTM C-469 specification the slope of linear zone in stress-strain diagram of a concrete sample under compression is a function of modulus of elasticity and it could be calculated using equation 1. To use this equation one must use equivalent stress of 40% of failure stress and its respective strain extracted from stress-strain diagram [Fig. 1]. These values are presented in Table 6.

$$E_c = \frac{(0.4F_{cy})}{\epsilon (0.4F_{cy})} \quad [1]$$

To study how modulus of elasticity change within various sample groups, diagram of modulus of elasticity variant against maximum compressive strength of lightweight concrete is sketched and presented in Fig. 2.

As it is obvious at low densities there is a relationship between modulus of elasticity and strength, so, with linear regression of calculated points equation 2 could be proposed by this study for

TABLICA 5 / TABLE 5

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONÓW Z KRUSZYWEM POLISTYRENOWYM.

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE WITH POLYSTYRENE

Specimen NO. Oznaczenie	Compressive strength after 7 days Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach, MPa	Average of f_{c-7} Średnia wytrzymałość po 7 dniach, MPa	Compressive strength after 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa	Average of f_{c-28} Średnia wytrzymałość po 28 dniach, MPa	f_{c-28} / f_{c-7} Stosunek wytrzymałości
D1500-S	9.4	9.5	16.4	15.1	1.60
D1500-M	8.6		12.7		
D1500-L	10.2		16.1		
D1000-S	4.8	5.0	6.6	6.7	1.35
D1000-M	4.4		5.5		
D1000-L	5.6		7.9		
D750-S	2.7	2.7	3.3	3.6	1.33
D750-M	2.5		3.3		
D750-L	2.7		4.0		
D500-S	1.4	1.6	2.2	2.1	1.30
D500-M	1.6		2.0		
D500-L	1.7		2.1		
D750-s-S	2.8	2.7	3.1	3.1	1.20
D750-s-M	2.2		2.5		
D750-s-L	2.7		3.6		

wa polistyrenowego powoduje zmniejszenie stosunku zaczynu cementowego do polistyrenu. Dodatkowo wytrzymałość betonu jest uzależniona od wytrzymałości kruszywa polistyrenowego, która jest dosyć mała i to ona decyduje o ostatecznym wyniku i szybkim spadku wytrzymałości z rosnącym udziałem polistyrenu. Wyniki wytrzymałości betonów zawierających mikrokrzemionkę [D750-s] dowodzą, że zastosowanie dodatku powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie, zwłaszcza w starszych próbkach. Spadek wytrzymałości względem próbki kontrolnej wyniósł około 4% dla próbek po 7 dniach i około 14% dla próbek po 28 dniach.

3.3. Moduł sprężystości

Zgodnie z definicjami podanymi w normie ASTM C-469, kąt nachylenia odcinka prostoliniowego na wykresie naprężenie-odkształcenie próbki betonu poddanej ściskaniu jest funkcją modułu sprężystości i można go obliczyć na podstawie równania 1. W celu uzyskania danych do równania należy do próbki przyłożyć siłę równą 40% wartości niszczącej i odczytać wartość odpowiadającego jej odkształcenia z wykresu naprężeń i odkształceń przedstawionego na rysunku 1. Wartości te przedstawiono w tabelicy 6.

$$E_c = \frac{(0,4F_{cy})}{\epsilon (0,4F_{cy})} \quad [1]$$

Rysunek 2 przedstawia wykres zależności modułu sprężystości względem maksymalnej wytrzymałości na ściskanie. Na jego

estimation of modulus of elasticity of lightweight EPS concrete regarding maximum compressive strength [only for samples: D-500, D-750 and D-1000].

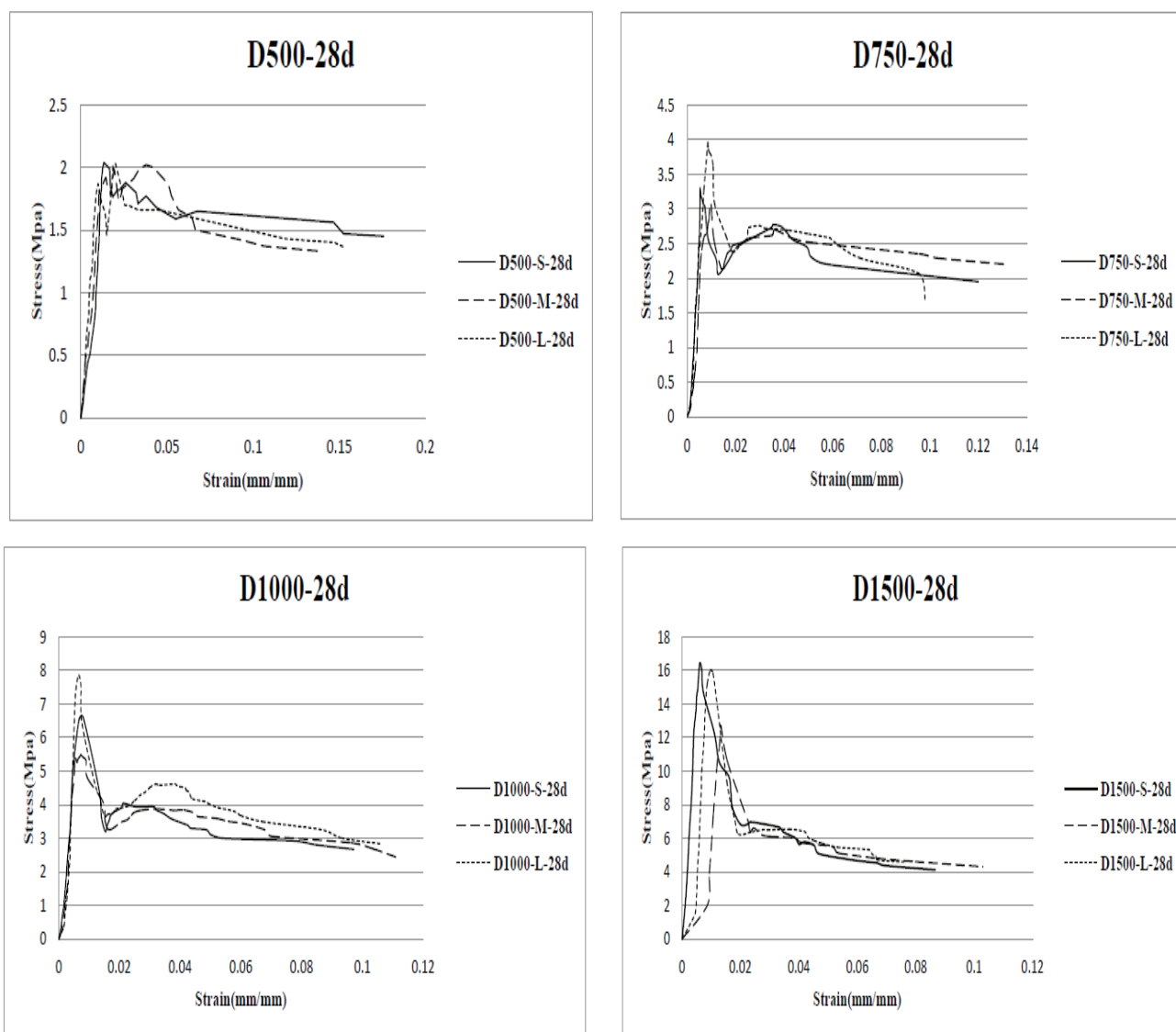
$$E_c = 131F_{cmax} - 90.4 \quad [2]$$

For high value of densities [samples D-1500] further investigations are needed to gain more accurate expressions.

Increasing content of polystyrene in concrete cause modulus of elasticity to decrease considerably. High polystyrene percentage induces considerably high deflection, sharp fall of compressive strength and modulus of elasticity. Concrete containing silica fume exhibited greater values of modulus of elasticity in respect to concrete without this pozzolanic material.

3.4. Impact resistance

According to ACI 544-R for impact resistance test, the measure of impact resistance is the accumulated number of required blows that initiate the first visible crack and number of blows needed for formation of the ultimate cracks and consequently failure of the sample. Table 7 shows the results of tests in the age of 7 and 28-days for samples containing 80% of polystyrene in respect to concrete volume and density of 522 kg/m³. To investigate impact resistance of concrete, different size of EPS have been used in tests. Table 7, shows that ultimate capacity is approximately more than 70% of initial capacity and 30% growth of 28-days-age samples in respect of 7-days-age samples. Further investigation of variation of polystyrene aggregates show a clear relation could



Rys. 1. Wykres naprężenie-odkształcenie dla próbek po 28 dniach: a) D-500, b) D-750, c) D-1000, d) D-1500

Fig. 1. Stress-strain graph of samples in the age of 28 days; a: D-500, b:D-750, c: D-1000, d:D-1500

TABLICA 6 / TABLE 6

MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI BETONÓW Z KRUSZYWEM POLISTYRENOWYM.

MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE WITH POLYSTYRENE

Sample name Oznaczenie	F_{cy} , MPa	$0.4 f_{cy}$, MPa	$\epsilon(0.4 f_{cy})$, mm/mm	E_c , MPa	f_c max, MPa
D1500-S-28d	16.4	6.56	0.0025	2624	16.4
D1500-M-28d	12.7	5.08	0.0100	508	12.7
D1500-L-28d	16.1	6.44	0.0060	1073	16.1
D1000-S-28d	6.6	2.64	0.0030	880	6.6
D1000-M-28d	5.4	2.16	0.0030	710	5.5
D1000-L-28d	7.9	3.16	0.0040	790	7.9
D750-S-28d	3.3	1.32	0.0032	413	3.3
D750-M-28d	2.6	1.04	0.0034	302	3.1
D750-L-28d	4.0	1.6	0.0033	485	4.0
D500-S-28d	1.8	0.72	0.0069	104	2.2
D500-M-28d	1.8	0.72	0.0054	133	2.0
D500-L-28d	1.1	0.44	0.0024	183	2.1

podstawie można określić jak zmienia się moduł sprężystości w różnych grupach próbek.

Dla próbek o małych gęstościach [D-500, D-750, D-1000] istnieje zależność pomiędzy modułem sprężystości a wytrzymałością, a zatem można zastosować metodę regresji liniowej [równanie 2] do oszacowania modułu sprężystości betonów lekkich z kruszyw polistyrenowych.

$$E_c = 131F_{cmax} - 90.4 \quad [2]$$

W przypadku betonów o większej gęstości [D-1500] potrzebne są dalsze badania prowadzące do uzyskania dokładniejszych przybliżeń.

Zwiększenie zawartości kruszywa polistyrenowego powoduje znaczny spadek modułu sprężystości. Duża zawartość polistyrenu powoduje znaczne odkształcenie próbki podczas ściskania oraz znaczne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie.

3.4. Udarność

Zgodnie z metodą ACI 544-R, udarnością jest liczba wymaganych uderzeń, które inicjują pierwszą widoczną szczelinę oraz liczba uderzeń powodująca powstanie krytycznego pęknięcia, a w konsekwencji uszkodzenie próbki. Tablica 7 przedstawia wyniki badań próbek zawierających 80% objętościowych polistyrenu w betonie i o gęstości równej 522 kg/m³. Badaniom poddano próbki po 7 i 28 dniach. W celu określenia wpływu wielkości kruszywa na odporności na uderzenia, badano betony zawierające kruszywo polistyrenowe o różnej wielkości. Dane w tablicy 7 pokazują, że liczba uderzeń powodująca zniszczenie jest w przybliżeniu o 70% większa od liczby uderzeń powodującej pierwsze pęknięcie. W przypadku próbek po 28 dniach liczba uderzeń jest o 30% większa niż dla próbek po 7 dniach. Przeprowadzone badania nie dały wyraźnych zależności wielkości kruszywa a odporności na uderzenia, więc konieczne są dodatkowe badania.

3.5. Odporność ogniowa

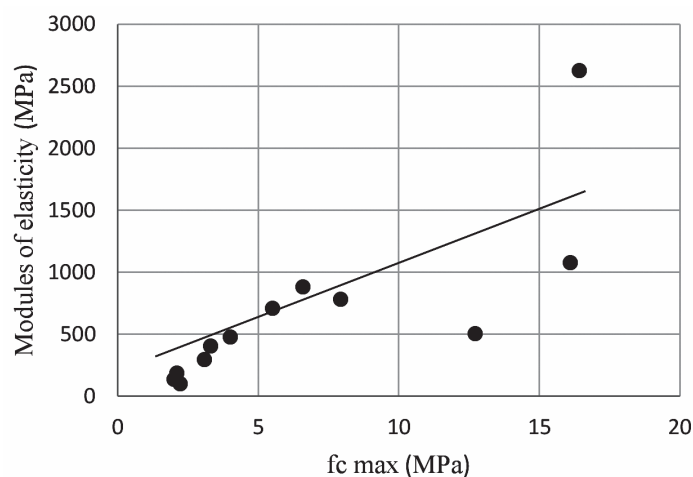
Zgodnie z metodą normy ASTM 119-00a w celu zbadania odporności na ogień betonu lekkiego z kruszywem polistyrenowym, próbki muszą być poddane bezpośredniemu działaniu płomienia przez okres 180 minut. Następnie należy dokonać pomiaru temperatury wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni próbki. Tablica 8 zawiera wyniki badań odporności ogniowej betonu zawierającego 80%

TABLICA 7 / TABLE 7

WYNIKI BADANIA UDARNOŚCI

RESULTS OF IMPACT RESISTANCE TESTS

Sample name Oznaczenie	Number of impact for initial crack Liczba uderzeń wywołująca początkowe pęknięcie	Number of impact for rapture Liczba uderzeń wywołująca pęknięcie krytyczne
D500-S-7d	6	11
D500-M-7d	6	11
D500-L-7d	7	12
D500-S-28d	11	16
D500-M-28d	8	14
D500-L-28d	8	14



Rys. 2. Zmiana modułu elastyczności w funkcji wytrzymałości na ściskanie

Fig. 2. Modulus of elasticity variation with respect to compressive strength of lightweight EPS concrete

not be obtained between size of these aggregates and impact resistance, so additional investigations are required.

3.5. Fire resistance

According to ASTM E 119-00a to investigate fire resistance of lightweight EPS concrete, samples must be subjected to direct fire flame for specific time period of 180 minutes. Then inner and outer temperatures of samples must be measured and recorded. Table 8 show fire resistance test results of lightweight concrete containing 80% of polystyrene and density of 522 kg/m³. The size effect of polystyrene aggregates was included in test implementations. Test results reveal that temperature difference between surface and core is about 95%. It is also clear that increasing the sizes of polystyrene aggregates results in reduction of heat conduction therefore causes better thermal resistance of concrete. Inspections of samples appearance after tests confirm that after heating for long period of time lightweight EPS concrete would not deteriorate severely. Water steam is the main factor of concrete deterioration during fire. Water steam cause intense inner pressure in concrete and then failure. In contrast while lightweight concrete containing polystyrene aggregates exposed to fire, EPS aggregates would burn out initially so a connected network of empty void would be left behind that helps water steam out and preventing of intense

TABLICA 8 / TABLE 8

WYNIKI BADAŃ OGNIODPORNOŚCI BETONÓW LEKKICH POLISTYRENOWYCH

TESTS RESULTS OF FIRE RESISTANCE OF LIGHTWEIGHT EPS CONCRETE

Sample name Oznaczenie	Time Czas, min	Inside temperature, Temperatura wewnętrzna °C	Outside Temperature, Temperatura zewnętrzna, °C	Temperature resistance Odporność na temperaturę, R
D500-S-28d	180	1300	60	19.38
D500-M-28d	180	1300	53	19.48
D500-L-28d	180	1300	50	20.00

polistyrenu i o gęstości równej 522 kg/m³. Próbki przeznaczone do badania wykonane były z różnych frakcji kruszywa. Wyniki badań wykazały, że różnica temperatur pomiędzy powierzchnią a rdzeniem próbki wynosi 95%. Zwiększenie rozmiarów kruszywa polistyrenowego powoduje zmniejszenie przewodzenia ciepła, a przez to lepszą odporność cieplną betonu. Ocena wyglądu próbek po próbach potwierdza, że po długich okresach ogrzewania lekki beton polistyrenowy nie pogorszy w dużym stopniu swoich właściwości. Para wodna jest głównym czynnikiem niszczenia betonu podczas pożaru, ponieważ na skutek gwałtownego wzrostu ciśnienia, powoduje stopniowe odspajanie jego warstw powierzchniowych. Betony lekkie zawierające kruszywo polistyrenowe poddane działaniu ognia w dużym stopniu zachowują swoje właściwości. Granule polistyrenu ulegają spalaniu, pozostawiając połączoną sieć porów, które odprowadzają parę wodną zapobiegając nagłemu wzrostowi ciśnienia. W związku z tym lekki beton polistyrenowy podczas pożaru byłby bardziej trwały, niż zwykły beton.

4. Wnioski

W doświadczeniach przedstawiono fizyczne właściwości lekkich betonów polistyrenowych. Betony przygotowano z trzech różnych frakcji granul polistyrenowych. Do niektórych mieszanek betonowych dodano mikrokrzemionkę. Zbadano pięć właściwości betonu: gęstość, wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, udarność i odporność ogniową. Wyniki badań wykazały, że:

- Moduł sprężystości i wytrzymałość na ściskanie zależą bardzo od gęstości, a wraz z jej spadkiem wspomniane właściwości ulegają znacznemu zmniejszeniu.
- Moduł sprężystości w funkcji wytrzymałości na ściskanie przyjmuje zależność liniową tylko dla betonów o niskiej gęstości.
- W badaniu udarności, całkowita liczba uderzeń powodująca zniszczenie próbek betonów z polistyrenem jest o około 70% większa od liczby uderzeń powodującej pierwsze pęknięcie.
- Ponieważ kruszywa polistyrenowe ulegają spalaniu, powstaje porowata mikrostruktura, która zapobiega wzrostowi ciśnienia pary wodnej i zapobiega w ten sposób zniszczeniu betonu.
- W związku z małą gęstością betonu polistyrenowego dodatek mikrokrzemionki nie poprawił wyraźnie jego właściwości fizycznych.

deteriorating pressure to build up. Thus lightweight EPS concrete would perform better than usual concrete during fire.

4. Conclusion

In this experimental, mechanical and physical properties of lightweight concrete containing polystyrene aggregates have been tested. Three different sizes of polystyrene aggregates and silica fume for some of samples were used. Five of concrete properties including density, compressive strength, modulus of elasticity, impact resistance and fire resistance have been tested. Tests results revealed the following:

- Modulus of elasticity and compressive strength are strongly affected by density and with decrease of latter, aforementioned properties fall sharply.
- Linear regression of expression relating modulus of elasticity and maximum compressive strength for low density ranges is of great accuracy.
- Ultimate capacity of EPS concrete against impact is 70% more than required capacity for crack initiation.
- Because polystyrene aggregates burn out, EPS concrete switch to a porous structure that relieve the inner pressure of water steam and therefore prevents from concrete deterioration.
- For low density of EPS concrete, using micro-silica would not improve physical and mechanical properties significantly.

Literatura / References

1. C. Bagon, S. Frondistou, Yannas, Marine, Floating concrete made with polystyrene expanded Beads, *Mag. Concr.Res.*, **28**, 225-229 (1976).
2. Yi Xu, Linhua Jiang, Jinxia Xu, Yang Li, Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick, *Constr. Build. Mater.*, **27**, 32-38 (2012).
3. R. Madandoust, M. Muhammad Ranjbar, S. Yasin Mousavi, An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene, *Constr. Build. Mater.*, **25**, 3721–3731 (2011).
4. B. Chen, J. Liu, Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads, *Constr. Build. Mater.* **21**, 7-11 (2007).
5. D. S. Babu, K. Ganesh Babu, W. T. Huan, Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete, *Cement. Concrete. Comp.*, **28**, 520-527 (2007).
6. K. Miled, K. Sab, R. L. Roy, Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modeling, *Mech. Mater.*, **39**, 222-40 (2007).
7. W. C. Tang, Y. Lo, A. Nadeem, Mechanical and drying shrinkage properties of structural graded polystyrene concrete, *Cem. Concrete. Comp.*, **30**, 403-409 (2008).
8. R. L. Roy, E. Parant, C. Boulay, Taking account the inclusions size in lightweight concrete compressive strength prediction, *Cem. Concr. Res.*, **35**, 770-775 (2005).
9. S. H. Perry, P. H. Bischoff, K. Yamura, Mix details and material behaviour of polystyrene aggregate concrete, *Mag. Concr. Res.*, **43**, 71-76 (1991).
10. P. H. Bischoff, K. Yamura, S. H. Perry, Polystyrene aggregate concrete subjected to hard impact, *Proc. Inst. Civil. Eng.*, **89**, 225-39 (1990).
11. K. Ganesh Babu, D. Saradhi Babu, Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume, *Cem. Concr. Res.*, **33**, 755-762 (2003).
12. ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken.
13. No. 389 ISIRI of Iran. Standard of Iran Portland cement. Institute of Standards and Industrial Research of Iran.