



MEHRTASH SOLTANI¹⁾
 REZA MOAYEDFAR²⁾
 POLIM CHAN YI WENB³⁾

EVALUATING THE EFFECT OF AGGREGATE SIZE, CEMENT CONTENT AND WATER-CEMENT RATIO ON PERFORMANCE OF PERVIOUS CONCRETE

OCENA WPŁYWU WIELKOŚCI ZIAREN KRUSZYWA, ZAWARTOŚCI CEMENTU ORAZ WSPÓŁCZYNNIKA WODNO-CEMENTOWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI BETONU WODOPRZEPUSZCZALNEGO

STRESZCZENIE. Powodzie należą do najpoważniejszych katastrof naturalnych i corocznie powodują znaczne straty. Zastosowanie nawierzchni drenażowych w celu umożliwienia wnikania wody w podłoże i zmniejszenia spływu wód z powierzchni utwardzonych stanowi ważny element zapobiegania powodziom. Głównym celem artykułu jest przedstawienie wpływu parametrów takich jak współczynnik wodno-cementowy (0,32, 0,35 i 0,38), zawartość cementu (350 kg/m³, 450 kg/m³ i 550 kg/m³) oraz rozmiar ziaren kruszywa (2,83 mm, 5,66 mm i 8,00 mm) na właściwości betonu jamistego: wodoprzepuszczalność, porowatość i wytrzymałość na ściskanie. Uzyskane wyniki wskazują, że największy wpływ na porowatość i wodoprzepuszczalność ma rozmiar ziaren kruszywa. Przy stałym współczynniku wodno-cementowym niższa zawartość cementu skutkowała wyższą porowatością betonu. W badaniach wodoprzepuszczalności i porowatości najwyższe wartości zaobserwowano dla kruszywa o uziarnieniu do 8,00 mm. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskano w przypadku betonu z kruszywem do 5,66 mm, współczynnikiem wodno-cementowym 0,35 i zawartością cementu 550 kg/m³.

SŁOWA KLUCZOWE: beton wodoprzepuszczalny, porowatość, projektowanie składu betonu, przepuszczalność, wytrzymałość na ściskanie.

ABSTRACT. Flash floods belong to the worst natural disasters and cause serious economic damage every year. Hence, use of pervious pavements in order to reduce surface runoff and allow the water to penetrate the soil is an important factor in flooding reduction. The main objective of the paper is to study the influence of various parameters, such as water-cement ratio (0.32, 0.35 and 0.38), cement content (350 kg/m³, 450 kg/m³ and 550 kg/m³) and aggregate size (2.83 mm, 5.66 mm and 8.00 mm), on the properties of pervious concrete in terms of water permeability, porosity and compressive strength. The obtained results revealed that aggregate size had the most significant effect on water permeability of pervious concrete. When a fixed water-cement ratio was considered, lower cement content provided higher porosity. Both in water permeability and porosity tests the highest values were observed for aggregate size of 8.00 mm. However, the results of the compressive strength test reached the highest value for the mixture with aggregate size of 5.66 mm, water-cement ratio of 0.35 and cement content of 550 kg/m³.

KEYWORDS: compressive strength, concrete mix design, permeability, permeable concrete, porosity.

DOI: 10.7409/rabdim.022.004

¹⁾ Arak University, Faculty of Engineering, Shahid Beheshti Street, 38156879 Arak, Iran; mehrtashsoltani@gmail.com

²⁾ Arak University, Faculty of Engineering, Shahid Beheshti Street, 38156879 Arak, Iran; r-moayedfar@araku.ac.ir (✉)

³⁾ University of Malaya, Department of Civil Engineering, Center for Transportation Research, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia; polim94@gmail.com

1. WSTĘP

Opady o dużej intensywności mogą skutkować wystąpieniem gwałtownych podtopień, które stanowią istotny problem na terenach silnie zurbanizowanych. Zniszczenia budynków mieszkalnych i infrastruktury spowodowane przez powodzie prowadzą do znacznych strat społecznych i ekonomicznych. Do podstawowych przyczyn gwałtownych podtopień zalicza się wzmożony spływ powierzchniowy spowodowany niską wodoprzepuszczalnością nawierzchni, zapychaniem drenażu oraz małą powierzchnią obszarów zdolnych do magazynowania wody, zwłaszcza w miastach. Nawierzchnie przepuszczalne mogą ograniczyć spływ powierzchniowy i umożliwić istotny wzrost infiltracji wód do gruntu, tym samym redukując prawdopodobieństwo wystąpienia szybkich podtopień w okresach roku o najwyższych opadach. Niemniej jednak, właściwy skład mieszanki betonowej jest kluczowym czynnikiem wpływającym na wodoprzepuszczalność, porowatość i wytrzymałość na ściskanie betonu.

Stwierdzono również, że nawierzchnie wodoprzepuszczalne (określane również jako porowate, jamiste czy drenażowe) nie tylko zwiększają infiltrację wody do gruntu (poprawiając zasilenie wód gruntowych), lecz także zapobiegają wnikaniu zanieczyszczeń w podłoże. Pomiar hałasu na nawierzchniach drogowych były tematem licznych badań na całym świecie [1]. Ponieważ beton jamisty może pochłaniać dźwięk pojazdów [2], jego zastosowanie może zredukować zanieczyszczenie hałasem oraz ograniczyć efekty użytkowania drogi na mieszkańców budynków znajdujących się w pobliżu.

Beton wodoprzepuszczalny może być stosowany na drogach i obszarach utwardzonych poddanych lekkim obciążeniom, np. na ścieżkach rowerowych i chodnikach, parkingach, skarpach (zabiegi przeciwoerozyjne) oraz drogach w dzielnicach mieszkaniowych o małym natężeniu ruchu [2-4]. Mieszanka betonu przepuszczalnego nie zawiera piasku (lub zawiera ograniczoną jego ilość), co prowadzi do znacznego wzrostu porowatości. Dzięki potencjałowi do redukcji spływu powierzchniowego i zapobiegania powodziom, beton przepuszczalny jest bardzo skutecznym elementem systemów zbierania wód opadowych, zwłaszcza na obszarach narażonych na powodzie [5]. Jak wspomniano powyżej, ze względu na wyższą porowatość beton przepuszczalny zazwyczaj wykazuje niższą wytrzymałość i trwałość niż typowy beton [5]. Gorsze właściwości wytrzymałościowe sprawiają, że nie może on przenieść znacznych obciążeń od pojazdów ciężkich czy ruchu o dużym natężeniu. W celu zwiększenia wytrzymałości betonu przepuszczalnego przy jednoczesnym zachowaniu jego wodoprzepuszczalności można regulować kilka czynników, w tym skład mieszanki, rodzaj użytego kruszywa czy zastosowanie domieszek.

1. INTRODUCTION

High rainfall intensity gives rise to flash floods, which are a major issue in developed cities. Destruction of housing and infrastructure by floods causes heavy social and economic losses. The root causes of flash floods include extremely high surface runoffs due to low infiltration in road pavements, clogging of drainage with various types of waste, and low water catchment area, especially in cities. Pervious pavements can reduce surface runoff and allow major infiltration into the ground, consequently reducing the probability of occurrence of flash floods in the seasons with the highest precipitation. However, mixture design of pervious concrete is a crucial factor affecting its water permeability, porosity and compressive strength. Hence, a suitable mix design should be determined for a pervious pavement.

It has also been acknowledged that permeable pavements (also referred to as pervious or porous pavements) not only increase water infiltration into ground (enhancing groundwater recharge), but also prevent pollutants from entering into subgrade. Measurements of noise on concrete pavements have been the subject of numerous studies worldwide [1]. As pervious concrete can absorb the noise of vehicles [2], its use may result in reduction of noise pollution and limit the impact of the road on the inhabitants of buildings located in its vicinity.

Permeable concrete can only be used in light-duty roads and paved areas, such as bicycle and pedestrian paths, parking lots, slope faces (erosion control) and light traffic roads in residential areas [2-4]. Pervious concrete mixture has little or no sand, which results in substantial void content. Pervious concrete is very effective in stormwater management solutions, due to its potential for reduction of surface runoff and prevention of floods, especially in flood-prone areas [5].

As mentioned above, pervious concrete is generally characterized by low strength and durability properties due to its high porosity in comparison to normal concrete [5]. Due to low strength characteristics, it cannot sustain heavy vehicle loads nor high traffic volumes. To increase the strength of pervious concrete and maintain its permeability at the same time, several aspects can be adjusted, such as mix design, types of aggregates and the presence of admixture.

Design of pervious concrete mixture is the process of selection of suitable water-cement ratio, cement content, aggregate size, etc. Different proportions affect the material properties of the mixture.

Projektowanie składu mieszanki betonu przepuszczalnego to proces doboru odpowiedniego współczynnika wodno-cementowego, zawartości cementu, uziarnienia kruszywa itd. Różne proporcje wpływają na właściwości uzyskanego materiału.

Współczynnik wodno-cementowy w/c w istotny sposób wpływa na wodoprzepuszczalność i wytrzymałość na ściskanie. Duża zawartość wody przekłada się na dobrą urabialność, lecz zwiększa zawartość wolnych przestrzeni. Zaczyn cementowy w betonie przepuszczalnym stanowi bardzo cienką warstwę otulającą ziarna kruszywa i pozwalającą na ich zespolenie. Uszkodzenia próbki betonu przepuszczalnego w badaniach wytrzymałości na ściskanie następują na powierzchniach styku między ziarnami kruszywa. W związku z tym beton przepuszczalny wykazuje stosunkowo niską wytrzymałość na ściskanie w porównaniu ze zwykłym betonem [2].

Stosunek zawartości wody do cementu jest w betonie przepuszczalnym najważniejszym czynnikiem, wpływa bowiem zarówno na wodoprzepuszczalność, jak i na wytrzymałość na ściskanie. Zakres współczynnika w/c optymalny ze względu na przepuszczalność i wytrzymałość na ściskanie wynosi od 0,30 do 0,38 [6]. Według [6] przy współczynniku w/c równym 0,34 zaobserwowano najwyższą wytrzymałość na ściskanie po 7 i po 28 dniach od zarobienia. W przedziale w/c poniżej 0,34 wytrzymałość na ściskanie lekko wzrastała wraz ze wzrostem współczynnika; dla w/c powyżej 0,34 wartość wytrzymałości jednak gwałtownie spadała.

Nguyen et al. [7] wyjaśniają, że właściwa ilość wody w mieszance maksymalizuje wytrzymałość na ściskanie, nie ograniczając przy tym przepuszczalności uzyskanego betonu jamistego. Niemniej jednak, w badaniu nie stwierdzono ewidentnej zależności między współczynnikiem wodno-cementowym a wytrzymałością betonu przepuszczalnego. Wzrost wytrzymałości zaczynu nie zawsze musi przełożyć się bezpośrednio na wzrost wytrzymałości uzyskanego betonu, jako że zaczyn stanowi jedynie niewielki procent objętości stwardniałego betonu.

W innym badaniu współczynnik wodno-cementowy stosowany w składzie betonu przepuszczalnego zawierał się w przedziale od 0,27 do 0,40 [4]. Jak stwierdzono w [8], wytrzymałość na ściskanie zaprawy zmniejsza się wraz ze wzrostem współczynnika w/c , zaś sama ilość cementu ma niewielki wpływ na wytrzymałość. Skurcz twardniejącej zaprawy wzrasta wraz ze wzrostem zawartości cementu. Ponadto przy stałej wartości współczynnika w/c wzrost zawartości cementu skutkuje wzrostem nasiąkliwości [8].

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że przeprowadzone dotąd badania poświęcone wielkości ziaren kruszywa, współczynnikiowi w/c oraz zawartości cementu w betonie

The water-cement ratio w/c is an important factor that affects water permeability and compressive strength. High water content results in good workability, but it increases the air void content of the mixture. Cement paste in pervious concrete is a very thin film on the surface of aggregate particles, which enables their bonding. The contact interface between aggregate particles is the point of failure in compressive strength tests of pervious concrete. Therefore, pervious concrete shows relatively low compressive strength compared to normal concrete [2].

The ratio of water to cement content is the most significant factor in pervious concrete, as it affects both water permeability and compressive strength. The optimum range of water-cement ratio for both water permeability and compressive strength is between 0.30 and 0.38 [6]. According to [6], the water-cement ratio of 0.34 yielded the highest compressive strength for both 7 and 28 days of curing. For water-cement ratio below 0.34, compressive strength slightly increased with an increase in the w/c ratio; however, for w/c above 0.34, compressive strength decreased steeply.

Nguyen et al. [7] explained that the correct amount of water will maximize compressive strength without compromising water permeability of pervious concrete. Nevertheless, no clear relationship between strength and water-cement ratio for pervious concrete has been found in that study. An increase in the strength of paste may not always lead to an increase in the overall strength of concrete, as the paste content is less than the voids content between aggregates.

In another study, the water-cement ratio used for pervious concrete mix design ranged from 0.27 to 0.40 [4]. As stated in [8], compressive strength of mortar decreases with an increase in water-cement ratio, while the cement content is of minor influence. Shrinkage of hardening mortar increases with an increase in cement content. Besides, for a given constant water-cement ratio, an increase in cement content results in higher water absorption [8].

Based on the literature review, the studies on aggregate size, water-cement ratio and cement content of pervious concrete performed so far are insufficient, and no study has discussed variations in these factors at the same time. Consequently, in this study, 27 different mixtures were tested. Water-cement ratio of the mix, cement content and the size of aggregate were varied – tested at three different levels each – to evaluate the effects of these parameters on the performance of pervious concrete. The obtained properties of pervious concrete, such as compressive strength,

przepuszczalnym nie są wyczerpujące; w żadnym badaniu nie analizowano jednocześnie zmian tych trzech czynników. W związku z tym w niniejszej pracy poddano badaniom 27 różnych mieszanek. Przyjmowano różne wartości współczynnika w/c , zawartości cementu i wielkości ziaren kruszywa – każdą zmienną badano na trzech różnych poziomach – aby poddać ocenie ich wpływ na charakterystykę betonu przepuszczalnego. Przedyskutowane zostaną uzyskane właściwości, takie jak wytrzymałość na ściskanie, porowatość i przepuszczalność. W większości dotychczasowych prac dostępnych w literaturze uwzględniano w składzie mieszanki betonu przepuszczalnego piasek, aby zwiększyć wytrzymałość betonu. Tym razem postanowiono więc przygotować i poddać badaniom mieszanki niezawierające piasku.

2. CEL BADANIA

Głównym celem niniejszej pracy badawczej było określenie wpływu różnych wartości współczynnika wodno-cementowego (0,32, 0,35 i 0,38), zawartości cementu (350 kg/m^3 , 450 kg/m^3 i 550 kg/m^3) oraz wielkości ziaren kruszywa (2,83 mm, 5,66 mm i 8,00 mm) na właściwości betonu przepuszczalnego: wodoprzepuszczalność, porowatość i wytrzymałość na ściskanie. Parametry te wybrano, ponieważ mają one największy wpływ na właściwości eksploatacyjne betonu. Chcąc uzupełnić i wzbogacić dostępną literaturę, postanowiono zrealizować powyższy cel poprzez rozważania teoretyczne i badania eksperymentalne.

3. MATERIAŁY I PRÓBKİ

3.1. SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH

W Tabl. 1, opartej na [9], przedstawiono skład chemiczny i właściwości fizyczne cementu portlandzkiego (OPC typu I) zastosowanego w niniejszym badaniu. Zastosowano kruszywo granitowe o wielkości ziaren 2,83 mm (sito nr 7), 5,66 mm (sito nr 3 1/2) oraz 8,00 mm (sito 5/16 cala). Po przesianiu kruszywo opłukano i wysuszono, a następnie przechowywano osobno uzyskane frakcje. Kruszywo o rozmiarze ziaren 2,83 mm oznacza tu frakcję przechodzącą przez sito 5,66 mm, a zatrzymaną na sicie 2,83 mm; analogicznie rozmiar ziaren 5,66 mm to frakcja przechodząca przez sito 8,00 mm, a zatrzymana na sicie 5,66 mm, zaś rozmiar 8,00 mm to frakcja od 8,00 mm do 9,51 mm.

Zawartość cementu to w składzie mieszanki betonowej istotny parametr, determinujący całkowitą zawartość porów w betonie. Autorzy [10] porównali różne ilości cementu – przy stałej założonej ilości kruszywa – w mieszance innego rodzaju. Zawartość zaczynu cementowego w wysokości 15% objętości (269 kg/m^3) oraz użycie kruszywa pumekowego (565 kg/m^3) poskutkowało najwyższą całkowitą zawartością porów: 31,8%.

porosity and permeability will be discussed. Previously most of the researchers did include sand in pervious concrete mixtures to increase their strength. Hence, it was decided not to include sand in the mixtures tested in this study.

2. RESEARCH OBJECTIVES

The main objective of this study was to determine the influence of various values of water-cement ratio (0.32, 0.35 and 0.38), cement content (350 kg/m^3 , 450 kg/m^3 and 550 kg/m^3) and aggregate size (2.83 mm, 5.66 mm and 8.00 mm) on properties of pervious concrete in terms of water permeability, porosity and compressive strength. These parameters have been chosen because they have the greatest impact on the performance of the mixture. In order to make a contribution that would complement the available literature, it was decided that the objectives will be achieved through experimental work and theoretical work.

3. MATERIALS AND SPECIMENS

3.1. COMPOSITION OF CONCRETE MIXES

Table 1, based on [9], represents the chemical composition and physical properties of Portland cement (OPC Type I) used in the study. Granite aggregates with the size of 2.83 mm (No. 7), 5.66 mm (No.3 1/2) and 8.00 mm (5/16 in.) were used. After sieving, the aggregates were washed and dried completely, then stored in a tray according to size. For the 2.83 mm size, aggregate passing from 5.66 mm and retained on 2.83 mm sieve is collected; for the 5.66 mm size, aggregate passing from 8.00 mm sieve and retained on 5.66 mm sieve is collected; finally, for the 8.00 mm size, aggregate passing from 9.51 mm sieve and retained on 8.00 mm sieve is collected.

Cement content is an important parameter in mixture design that determines the total void ratio in pervious concrete. The authors of [10] compared various cement content with a fixed amount of aggregate in a different mixture. Cement paste content of 15% by volume (269 kg/m^3) with pumice aggregate (565 kg/m^3) resulted in the highest total void ratio: 31.8%. However, for the same amount of pumice aggregate, but with cement content increased to 25% by volume (448 kg/m^3), the total void ratio equaled 19.1%.

The amount of each material needed was calculated for the 27 combinations shown in Table 2. Set 1 is the series with aggregate size of 2.83 mm, set 2 – with aggregate size of 5.66 mm, set 3 – with aggregate size of 8.00 mm.

Niemniej jednak, przy tej samej ilości kruszywa pumeksowego, lecz z zawartością cementu zwiększoną do 25% objętości (448 kg/m^3), całkowita zawartość porów wyniosła 19,1%.

Dla każdej z 27 kombinacji mieszanek przedstawionych w Tabl. 2 obliczono potrzebną ilość każdego ze składników. Zestaw 1 zawiera kruszywo o rozmiarze ziaren 2,83 mm, zestaw 2 – odpowiednio 5,66 mm, zaś zestaw 3 – 8,00 mm.

Po zaprojektowaniu składu mieszanek betonowych rozpoczęto proces przygotowania i badania próbek (Rys. 1), mający na celu określenie porowatości, przepuszczalności i wytrzymałości wszystkich kombinacji.

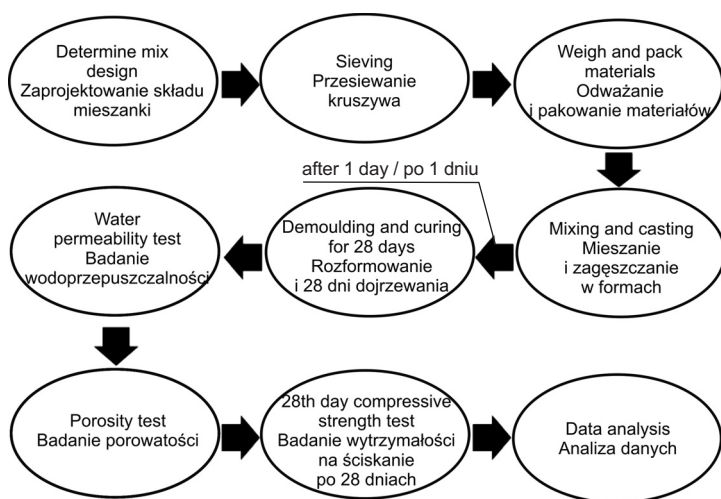


Fig. 1. Laboratory workflow chart
Rys. 1. Schemat prac laboratoryjnych

3.2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK I WARUNKI DOJRZEWANIA

Przed wykonaniem próbek precyzyjnie odważono docelowe ilości kruszywa i cementu, po czym spakowano je do odpowiednio opisanych toreb foliowych. Procedura mieszania i formowania próbek była zgodna z normą ASTM C 192/C 192M [11]. Jak widać na Rys. 2 i 3, odważoną wcześniej ilość kruszywa i cementu umieszczano w kuwecie laboratoryjnej i dokładnie mieszano. Następnie wlewano do niej jedną trzecią docelowej ilości wody i kontynuowano mieszanie, aby upewnić się, że kruszywo jest równomiernie pokryte cementem. Gdy dodana została cała woda, mieszanka była gotowa do umieszczenia w formach. W ramach niniejszej pracy przygotowywano i badano próbki walcowe o średnicy 5 cm i wysokości 10 cm.

Table 1. Chemical composition and physical properties of Portland cement [9]
Tablica 1. Skład chemiczny i właściwości fizyczne cementu portlandzkiego [9]

Chemical composition Skład chemiczny		Phase composition Skład mineralny	
Constituents Składniki	Content [%] Zawartość	Bogue compound Składnik wg Bogue'a	[%] by mass masy
CaO	64.00	C ₃ S	58.62
SiO ₂	20.29	C ₂ S	13.95
SO ₃	2.61	C ₃ A	9.26
Fe ₂ O ₃	2.94	C ₄ AF	8.95
Al ₂ O ₃	5.37	Physical properties Właściwości fizyczne	
MgO	3.13	Specific gravity [kg/m ³] Ciężar właściwy	3.15
P ₂ O ₃	0.07	Strength class Klasa wytrzymałości	42.5R
K ₂ O	0.17		
TiO ₂	0.12		
Mn ₂ O ₃	0.12		
Na ₂ O ₃	0.24		
Others Pozostałe	0.94		
Loss on ignition Strata prażenia	1.40		

After the mixtures had been designed, the process of sample preparation and testing started (Fig. 1). The aim was to obtain the results of porosity, permeability and compressive strength for all the mixes.

3.2. SAMPLE PREPARATION AND MATURATION CONDITIONS

Accurate amounts of aggregate and cement were weighed and packed in properly labeled plastic bags before casting. The mixing and casting procedures were performed according to ASTM C 192/C 192M [11]. As shown in Figs 2 and 3, the packed aggregate and cement were poured into a tray and mixed thoroughly using a trowel. One-third of the water was then poured into the mix and the mixing process was continued to ensure that the surface of aggregate was covered with cement. When the water was fully added to the mix, the specimens were ready for casting. The specimens considered in this study were all cylindrical, with diameter of 5 cm and height of 10 cm.

Table 2. Mix design for 81 samples
 Tablica 2. Składy mieszanek dla 81 próbek

Specimen Próbka	Aggregate Kruszywo [mm] Weight Masa [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	w/c	Specimen Próbka	Aggregate Kruszywo [mm] Weight Masa [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	w/c	Specimen Próbka	Aggregate Kruszywo [mm] Weight Masa [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	w/c		
G-1-1	2.83	350	0.32	H-1-1	5.66	350	0.32	I-1-1	8.00	350	0.32		
G-1-2				H-1-2				I-1-2					
G-1-3				H-1-3				I-1-3					
G-2-1		450		0.32		H-2-1		450		0.32		I-2-1	450
G-2-2						H-2-2						I-2-2	
G-2-3						H-2-3						I-2-3	
G-3-1		550		0.32		H-3-1		550		0.32		I-3-1	550
G-3-2						H-3-2						I-3-2	
G-3-3						H-3-3						I-3-3	
D-1-1	1670	350	0.35	E-1-1	1620	350	0.35	F-1-1	1540	350	0.35		
D-1-2				E-1-2				F-1-2					
D-1-3				E-1-3				F-1-3					
D-2-1		450		0.35		E-2-1		450		0.35		F-2-1	450
D-2-2						E-2-2						F-2-2	
D-2-3						E-2-3						F-2-3	
D-3-1		550		0.35		E-3-1		550		0.35		F-3-1	550
D-3-2						E-3-2						F-3-2	
D-3-3						E-3-3						F-3-3	
A-1-1	1670	350	0.38	B-1-1	1620	350	0.38	C-1-1	1540	350	0.38		
A-1-2				B-1-2				C-1-2					
A-1-3				B-1-3				C-1-3					
A-2-1		450		0.38		B-2-1		450		0.38		C-2-1	450
A-2-2						B-2-2						C-2-2	
A-2-3						B-2-3						C-2-3	
A-3-1		550		0.38		B-3-1		550		0.38		C-3-1	550
A-3-2						B-3-2						C-3-2	
A-3-3						B-3-3						C-3-3	



Fig. 2. Mixing of aggregate and cement with water
 Rys. 2. Mieszanie kruszywa i cementu z wodą



Fig. 3. Preparation of samples
Rys. 3. Formowanie próbek

Po wypełnieniu formy mieszanką do połowy wysokości zagęszczano pierwszą warstwę mieszanki ubijakiem (Rys. 3). Próbkę zagęszczano łącznie w trzech warstwach, po 25 uderzeń na warstwę. Formy z zagęszczoną mieszanką przykryto papierem, aby zapobiec parowaniu wody z próbek. Dla każdej z mieszanek przygotowano trzy próbki, a ponieważ badanie obejmuje 27 różnych projektów składu mieszanki, łącznie uformowano 81 próbek. Na Rys. 4 widoczna jest część próbek po rozformowaniu.

Half of the mold was filled with mix and then rodding was applied (Fig 3). Compaction was completed by placing the mixture in three layers and applying 25 strokes of the tamping rod per each layer. Finally, the molds with samples were covered with paper to prevent the moisture from evaporating. Three samples were made per each mixture, and since 27 mixes were considered in this study, 81 samples were formed in total. Several samples after demolding are shown in Fig. 4.



Fig. 4. Pervious concrete samples
Rys. 4. Próbkki betonu przepuszczalnego

4. PLAN I METODY BADAŃ

4.1. OCENA PRZEPUSZCZALNOŚCI

W celu dokonania oceny właściwości betonu przepuszczalnego przeprowadzono trzy istotne badania: wodoprzepuszczalności, porowatości i wytrzymałości na ściskanie. Poniżej przedstawiono metodykę tych badań.

Wodoprzepuszczalność wyrażona współczynnikiem filtracji k to najważniejszy parametr w badaniach betonu przepuszczalnego, ponieważ właśnie ta charakterystyczna właściwość odróżnia go od zwykłego betonu. Wodoprzepuszczalność to zdolność betonu do przepuszczania wody pod wpływem różnicy ciśnień [12]. Do laboratoryjnego oznaczenia współczynnika filtracji k stosuje się metodę badania przy stałym spadku hydraulicznym lub pod obniżającym się słupem wody. Jak wyjaśniono w [12], badanie przy stałym spadku hydraulicznym stosuje się dla materiałów o wysokiej przepuszczalności (przy k większym od 10^{-2} mm/s), zaś badanie pod opadającym słupem wody – dla materiałów o k mniejszym niż 1 mm/s.

Metody badań wodoprzepuszczalności oparte są na prawie Darcy'ego. W badaniu przy stałym spadku hydraulicznym, pomiaru współczynnika k można dokonać po ustabilizowaniu się prędkości przepływu [10, 13-15]. W badaniu pod opadającym słupem wody próbka zabezpieczona lateksową membraną poddana jest grawitacyjnemu przepływowi wody ze znajdującej się ponad nią pionowej rurki, a mierzony jest czas, w którym zwierciadło wody w rurce obniży się od poziomu początkowego do końcowego [16-19]. To właśnie badanie przeprowadzono na próbkach po 28 dniach od ich wykonania (zarobienia). Wzór na obliczenie współczynnika k na podstawie badania pod opadającym słupem wody jest następujący:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right), \quad (1)$$

gdzie:

- k – współczynnik filtracji [cm/s],
- a – pole przekroju pionowej rurki [cm²],
- L – długość próbki [cm],
- A – pole przekroju próbki [cm²],
- t – czas [s], w którym zwierciadło wody w rurce opada od początkowej wysokości do końcowej wysokości.
- h_1 – początkowa wysokość wody w rurce [cm],
- h_2 – końcowa wysokość wody w rurce [cm].

4. RESEARCH PLAN AND TEST METHODS

4.1. PERMEABILITY ASSESSMENT

Three important tests, including permeability, porosity and compressive strength were conducted in order to evaluate the performance of pervious concrete. The methodology of the tests is presented below.

The higher the water permeability coefficient k , the higher the rate of water infiltration into pervious concrete. Water permeability is the most important parameter in testing of pervious concrete, as it is the most characteristic property that distinguishes the material from normal concrete. Water permeability is the ability of water to pass through pervious concrete in the presence of a pressure gradient [12]. Some researchers used the constant head method, while some used the falling head method to determine the coefficient of water permeability k . As explained in [12], constant head permeability is used for material with high permeability, where k is greater than 10^{-2} mm/s, whereas the falling head method is suitable for material with permeability coefficient less than 1 mm/s.

The permeability tests are based on Darcy's law. In the constant head method, the permeability test can only be carried out when the flow rate reaches a steady state [10, 13-15]. In the falling head method, the water is allowed to pass through the sample enclosed in latex membrane and the time in which water falls from the initial water level to the final water level in the standing pipe is recorded [16-19]. This test was carried out after 28 days of curing. The formula to calculate the water permeability coefficient k using the falling head method is as follows:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right), \quad (1)$$

where:

- k – the coefficient of water permeability [cm/s],
- a – the cross-sectional area of standing pipe [cm²],
- L – the length of the sample [cm],
- A – the cross-sectional area of the sample [cm²],
- t – the time [s], in which the water falls from the initial level to the final level,
- h_1 – the initial height of water in the pipe [cm],
- h_2 – the final height of water in the pipe [cm].

4.2. POROWATOŚĆ

Porowatość to istotny parametr wpływający na przepływ wody w betonie przepuszczalnym [16]. Parametr ten był badany na próbkach betonu po upływie 28 dni od wykonania (zarobienia). Obliczeń porowatości dokonywano na podstawie masy próbki zanurzonej w wodzie oraz masy tej samej próbki w stanie suchym (po 24 godzinach suszenia), korzystając z poniższego wzoru [18-19]:

$$p = 1 - \left(\frac{w_2 - w_1}{V \cdot \rho} \right), \quad (2)$$

gdzie:

p – porowatość [%],

w_2 – masa próbki zanurzonej w wodzie [kg],

w_1 – masa próbki w stanie suchym [kg],

V – objętość próbki [m^3],

ρ – gęstość wody [kg/m^3].

4.3. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na wszystkich próbkach po upływie 28 dni od zarobienia. Badanie przeprowadzono na próbkach walcowych o wymiarach opisanych powyżej. Prędkość przyrostu siły ściskającej w badaniu wynosiła 0,50 kN/s.

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

5.1. WPŁYW PARAMETRÓW SKŁADU MIESZANKI NA PRZEPUSZCZALNOŚĆ BETONU

Poniżej zostały przedstawione wyniki badań przepuszczalności, porowatości i wytrzymałości na ściskanie betonu. Należy zaznaczyć, że podane wyniki stanowią wartości średnie z pomiarów wykonanych dla 3 próbek przypadających na każdą mieszankę.

Jak wspomniano powyżej, wodoprzepuszczalność jest najważniejszym parametrem wyróżniającym beton przepuszczalny. W niniejszym badaniu wodoprzepuszczalność mierzono pod obniżającym się słupem wody, metodą opisaną w [16-19]. Wysoka przepuszczalność betonu związana jest z dużymi porami, zaś niska – z małymi [16]. Zazwyczaj woda przepływa przez beton porowaty z prędkością 0,2 cm/s lub większą, zależnie od charakteru składników i projektu mieszanki [20].

Wodoprzepuszczalność związana jest z obecnością dużych porów między ziarnami kruszywa. Liczba i wielkość wolnych przestrzeni uzależniona jest od rozmiaru ziaren kruszywa, współczynnika w/c oraz zawartości cementu. Zbadano wpływ tych parametrów na wodoprzepuszczalność betonu,

4.2. POROSITY

Porosity is a significant factor that affects the flow rate of water in pervious concrete [16]. The porosity test was conducted after 28 days of curing. Porosity was calculated based on the weight of the pervious concrete sample submerged in water and the weight after air drying for 24 hours. The formula used to calculate porosity [18-19] is:

$$p = 1 - \left(\frac{w_2 - w_1}{V \cdot \rho} \right), \quad (2)$$

where:

p – the porosity [%],

w_2 – the weight of the sample submerged in water [kg],

w_1 – the weight of the sample in dry condition [kg],

V – the volume of the sample [m^3],

ρ – the density of water [kg/m^3].

4.3. COMPRESSIVE STRENGTH

The compressive strength test was carried out for all samples after curing for 28 days. As described above, tests were conducted on cylindrical specimens. The rate of increase in the compressive force equaled 0.50 kN/s.

5. TEST RESULTS AND THEIR ANALYSIS

5.1. INFLUENCE OF PARAMETERS OF CONCRETE COMPOSITION ON PERMEABILITY

The results of the concrete permeability, porosity and compressive strength tests are presented below. It should be noted that the results given are the average values from 3 samples tested for each mixture.

As mentioned above, permeability is the most important parameter in pervious concrete. In this study, water permeability was tested according to the falling head method, as described in [16-19]. High permeability of pervious concrete is associated with large pores, while low permeability – with small pores [16]. Normally, water flows through pervious concrete at rates of 0.2 cm/s and greater, depending on the type of material and mixture design [20].

Permeability is associated with air voids between aggregate particles. The size and number of voids is affected by aggregate size, water-cement ratio and cement content. Their effect on permeability of pervious concrete was investigated in order to determine suitable mix design resulting in optimum permeability.

aby określić odpowiedni skład mieszanki pozwalający na uzyskanie optymalnej przepuszczalności.

Na Rys. 5 przedstawiono porównanie wyników uzyskanych dla betonu o różnej zawartości cementu. Wyniki wskazują, że beton przepuszczalny o zawartości cementu 350 kg/m^3 charakteryzuje wyższe współczynniki filtracji, z maksimum równym $2,60 \text{ cm/s}$ zarejestrowanym dla próbek z kruszywem o uziarnieniu do 8 mm i współczynnikiem $w/c = 0,32$. Wyniki pokazują również, że przepuszczalność spada znacząco wraz ze wzrostem ilości cementu; przy zawartości cementu 350 kg/m^3 maksymalna pomierzona przepuszczalność wyniosła około $2,60 \text{ cm/s}$, zaś dla 550 kg/m^3 maksymalna wartość wyniosła $1,30 \text{ cm/s}$. Wzrost zawartości cementu w mieszance od 350 kg/m^3 do 550 kg/m^3 doprowadził do zmniejszenia wodoprzepuszczalności betonu o około 50% .

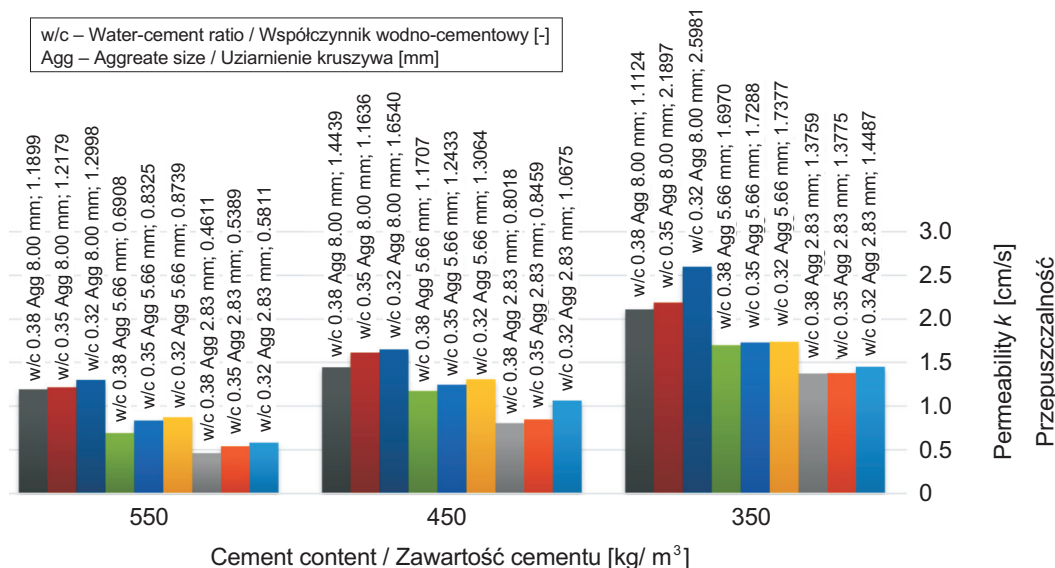


Fig. 5. The effect of cement content on permeability
Rys. 5. Wpływ zawartości cementu na przepuszczalność

Jak widać na Rys. 6, zmiana wartości współczynnika w/c nie ma istotnego wpływu na przepuszczalność betonu. Niemniej jednak, próbki o współczynniku w/c wynoszącym $0,38$ wykazały nieznaczny spadek przepuszczalności w porównaniu do próbek o niższych wartościach współczynnika. Najpewniej mieszanki o współczynniku w/c równym $0,38$ charakteryzowały się wyższym zagęszczeniem, co przełożyło się na niższą porowatość i przepuszczalność.

Wyniki badań przedstawione na Rys. 7 pokazują, że wraz ze zmniejszeniem uziarnienia kruszywa zmniejsza się istotnie przepuszczalność betonu. Współczynniki filtracji pomierzone dla próbek z kruszywem do 8 mm były dwa razy wyższe niż dla próbek z kruszywem do $2,83 \text{ mm}$.

Fig. 5 presents a comparison of results obtained for concrete with different cement content. The results show that pervious concrete with cement content of 350 kg/m^3 is characterized by higher permeability rates, with a maximum of 2.60 cm/s recorded for the samples made with 8 mm aggregate and water-cement ratio of 0.32 . The results also demonstrated that permeability decreases significantly with an increase in the cement content; while for the cement content of 350 kg/m^3 the maximum permeability was around 2.60 cm/s , the maximum reading for cement content of 550 kg/m^3 was 1.30 cm/s . The obtained values show that an increase in the cement content from 350 kg/m^3 to 550 kg/m^3 resulted in a decrease in permeability by about 50% .

As shown in Fig. 6, the change in the water-cement ratio does not have a substantial effect on permeability. However, samples with water-cement ratio of 0.38 exhibited a small decrease in permeability compared with samples with lower water-cement ratio. It appears that mixes with 0.38 water-cement ratio were characterized by higher level of compaction, which resulted in lower porosity and permeability.

The test results presented in Fig. 7 show that with a reduction in the size of the aggregate, the permeability is reduced considerably. Permeability rates registered for samples with 8.00 mm aggregate were 2 times higher than those obtained for samples with 2.83 mm aggregate.

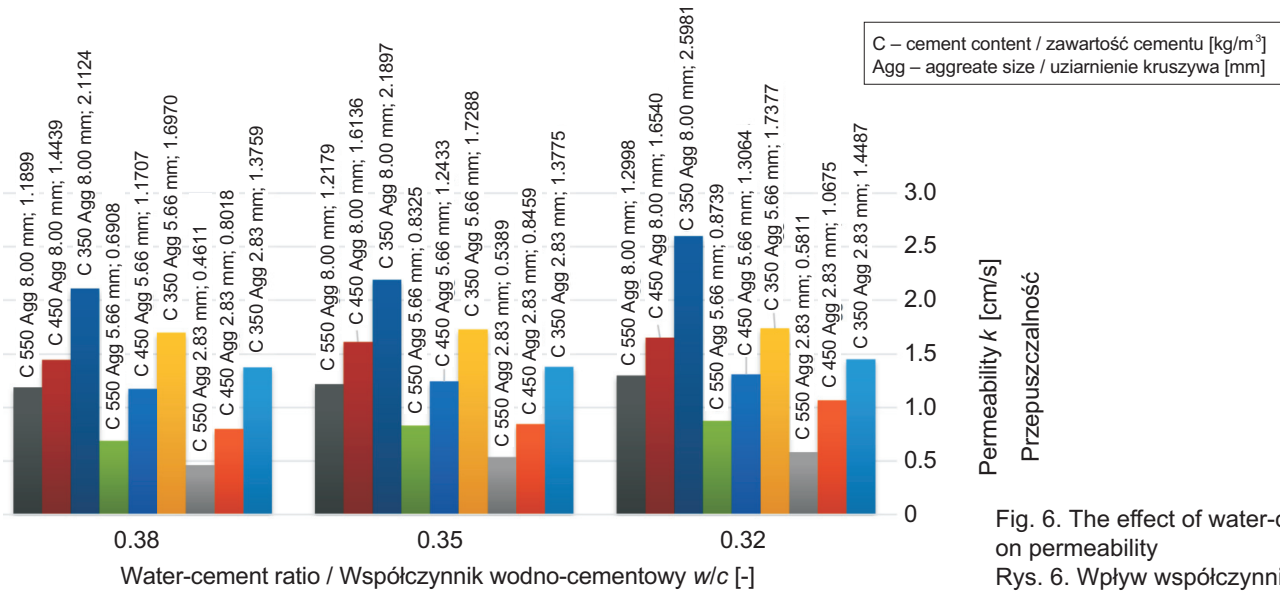


Fig. 6. The effect of water-cement ratio on permeability
Rys. 6. Wpływ współczynnika w/c na przepuszczalność

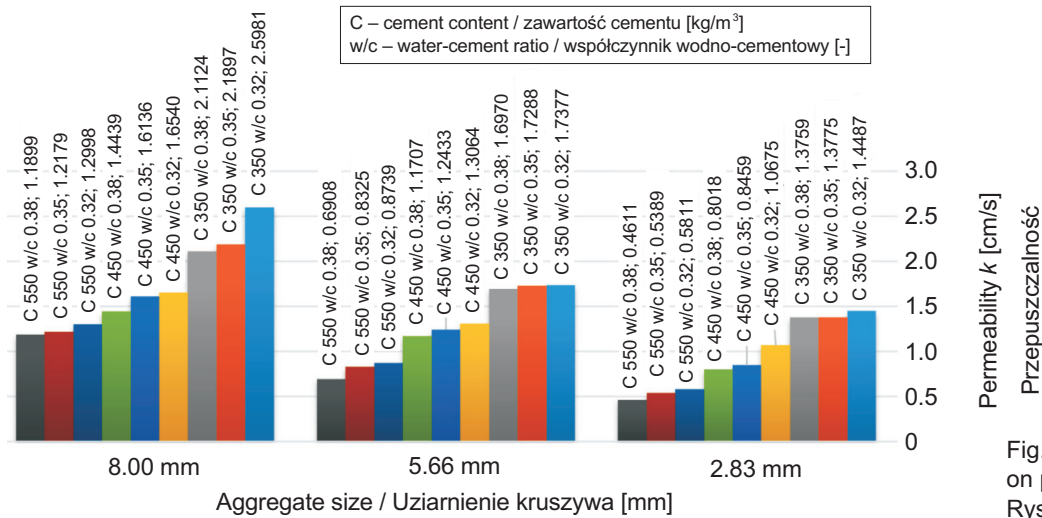


Fig. 7. Effects of aggregate size on permeability
Rys. 7. Wpływ uziarnienia kruszywa na przepuszczalność

Zaobserwowano ogólną prawidłowość, iż próbki z zawartością cementu 350 kg/m^3 charakteryzowały się wyższą wodoprzepuszczalnością niż próbki z zawartością cementu 450 kg/m^3 . Ponadto próbki zawierające kruszywo do 8 mm wykazywały wyższą wodoprzepuszczalność niż próbki z kruszywem do 5,66 mm i 2,83 mm.

5.2. WPŁYW SKŁADU MIESZANKI NA POROWATOŚĆ BETONU

Na prędkość przepływu wody przez beton przepuszczalny ma wpływ jego porowatość. Wyniki przedstawione w [21] wskazują, że w celu osiągnięcia porowatości w przedziale od 20% do 30% należy wyeliminować z mieszanki piasek. Na wartość porowatości ma również wpływ metoda zagęszczenia i rodzaj kruszywa [17]. Drobne ziarna kruszywa w naturalny sposób

Overall, samples with cement content of 350 kg/m^3 were characterized by higher water permeability than samples with cement content of 450 kg/m^3 . Moreover, samples made with 8.00 mm aggregate exhibited higher permeability than samples made with 5.66 mm and 2.83 mm aggregate.

5.2. INFLUENCE OF CONCRETE COMPOSITION ON POROSITY

The flow rate of water in pervious concrete is affected by porosity. Porosity is tested through determination of the void content in pervious concrete. Results presented in [21] revealed that in order to achieve porosity within the range of 20% to 30%, sand should be excluded from the

wypełniają wolne przestrzenie między ziarnami grubszymi, tym samym obniżając porowatość betonu. W związku z powyższym, w niniejszej pracy zbadano wpływ wielkości kruszywa, współczynnika w/c i zawartości cementu na porowatość betonu przepuszczalnego.

Stwierdzono istotną zależność między ilością użytego cementu a porowatością, co obrazuje Rys. 8. Wraz ze wzrostem zawartości cementu zmniejszała się porowatość, co łączyć należy ze wzrostem gęstości mieszanki. Najwyższą wartość porowatości (35,29%) odnotowano dla próbki z kruszywem o uziarnieniu 8,00 mm, współczynnikiem w/c równym 0,32 mm i zawartością cementu 350 kg/m^3 . Najniższą wartość (15,23%) stwierdzono natomiast dla próbki z kruszywem o uziarnieniu 2,83 mm, współczynnikiem w/c równym 0,38 mm i zawartością cementu 550 kg/m^3 .

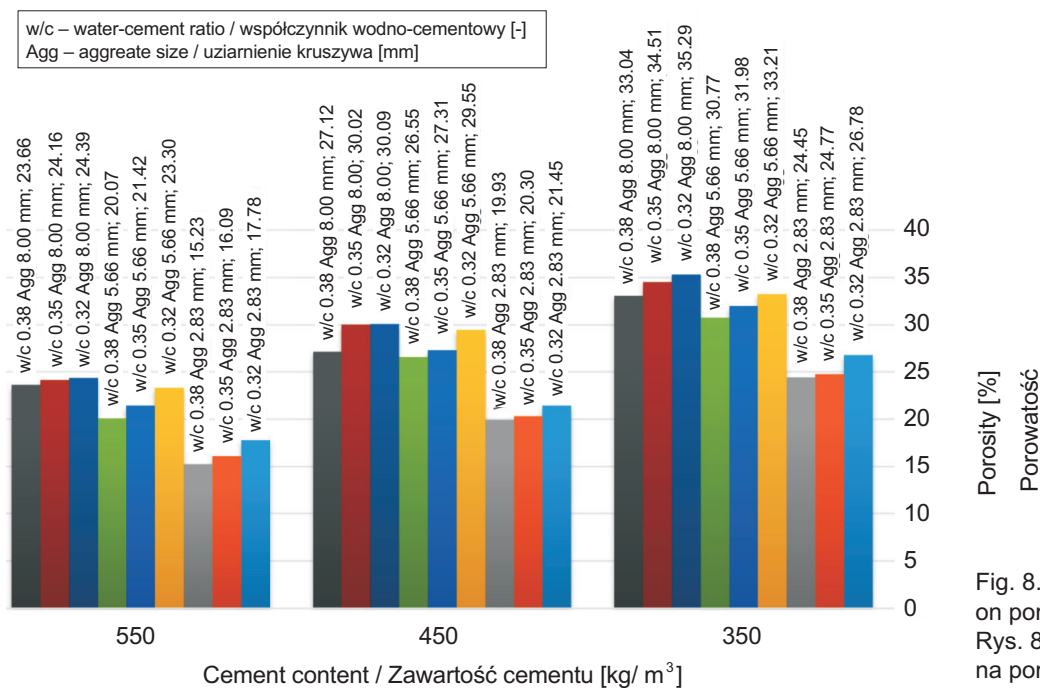


Fig. 8. Effect of cement content on porosity

Rys. 8. Wpływ zawartości cementu na porowatość

Jak wynika z Rys. 9, nie stwierdzono istotnych różnic w porowatości między mieszankami o różnych współczynnikach w/c . Zmiany współczynnika w/c nie mają istotnego wpływu na porowatość betonu przepuszczalnego

Rys. 10 przedstawia interesującą zależność. Wraz ze spadkiem wielkości kruszywa dochodzi do istotnego zmniejszenia porowatości. Maksymalną porowatość 35,29% stwierdzono dla próbek z kruszywem do 8,00 mm, a dla kruszywa 5,66 mm oraz 2,83 mm wynosiła odpowiednio: 33,21% oraz 26,78%. Zmniejszenie porowatości wraz ze zmniejszeniem

mixture. The value of porosity is also considerably affected by the method of compaction and the types of aggregate used [17]. Fine aggregate particles naturally fill the voids between coarse aggregate particles, decreasing the porosity of pervious concrete. Hence, this experiment encompassed the influence of aggregate size, water-cement ratio and cement content on the porosity of pervious concrete.

A significant relationship between cement content and porosity was found, as shown in Fig. 8. With an increase in the cement content, porosity decreased, which should be associated with the increasing density of the mixture. The highest value of porosity (35.29%) was noted for the sample made with 8.00 mm aggregate, water-cement ratio of 0.32 and cement content of 350 kg/m^3 . In contrast, the lowest value (15.23%) was obtained for the sample made with 550 kg/m^3 of cement, 2.83 mm aggregate and water-cement ratio of 0.38.

As illustrated by Fig. 9, no substantial differences in porosity were noted between mixtures of various water-cement ratio. The change in the water-cement ratio does not have a significant effect on porosity.

An interesting relationship is presented in Fig. 10. With a decrease in the aggregate size, porosity is decreased significantly. The maximum porosity values recorded for the samples made with aggregate size of 8.00 mm, 5.66 mm and 2.83 mm equaled 35.29%, 33.21% and 26.78%, respectively. Reduction of porosity with a decrease in the

uziarnienia kruszywa było wprawdzie spodziewaną obserwacją, lecz jednym z głównych celów niniejszego badania było określenie, jak szybko zmniejszenie to następuje dla kolejnych przedziałów rozmiaru kruszywa. Z zestawienia uzyskanych wartości wynika, że różnica porowatości pomiędzy próbkami z kruszywem do 8,00 mm a próbkami z kruszywem o uziarnieniu do 2,83 mm wynosiła 30-40%.

Podsumowując, próbki z zawartością cementu 350 kg/m^3 wykazywały porowatość wyższą niż pozostałe próbki. Próbki z kruszywem o uziarnieniu 8,00 mm miały najwyższą porowatość, ponieważ grubsze kruszywo tworzy stos okruszowy o większej jamistości.

size of aggregate was an expected observation. However, determination of the rate of this reduction was one of the main objectives of this study. Upon comparison of the results, it can be stated that a 30-40% reduction in porosity was noted for samples with 2.83 mm aggregate vs. those with 8.00 mm aggregate.

Overall, samples with cement content of 350 kg/m^3 had higher porosity than other samples. Samples made with 8.00 mm aggregate had the highest porosity, because coarser aggregate generates larger voids between aggregate particles.

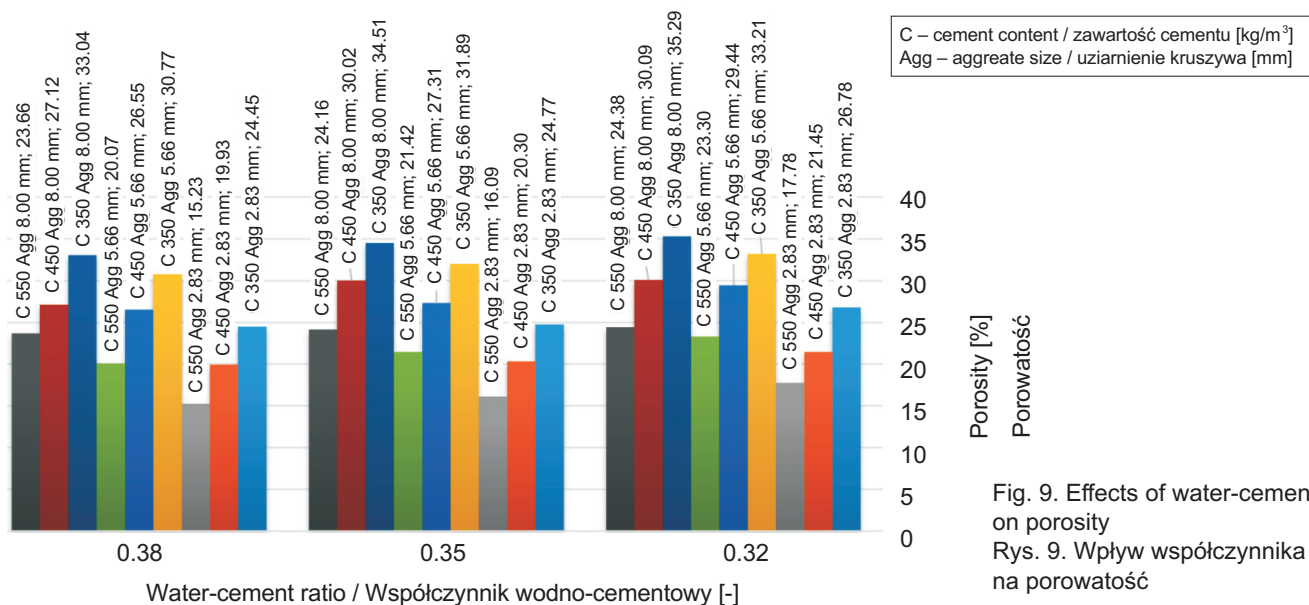


Fig. 9. Effects of water-cement ratio on porosity
Rys. 9. Wpływ współczynnika w/c na porowatość

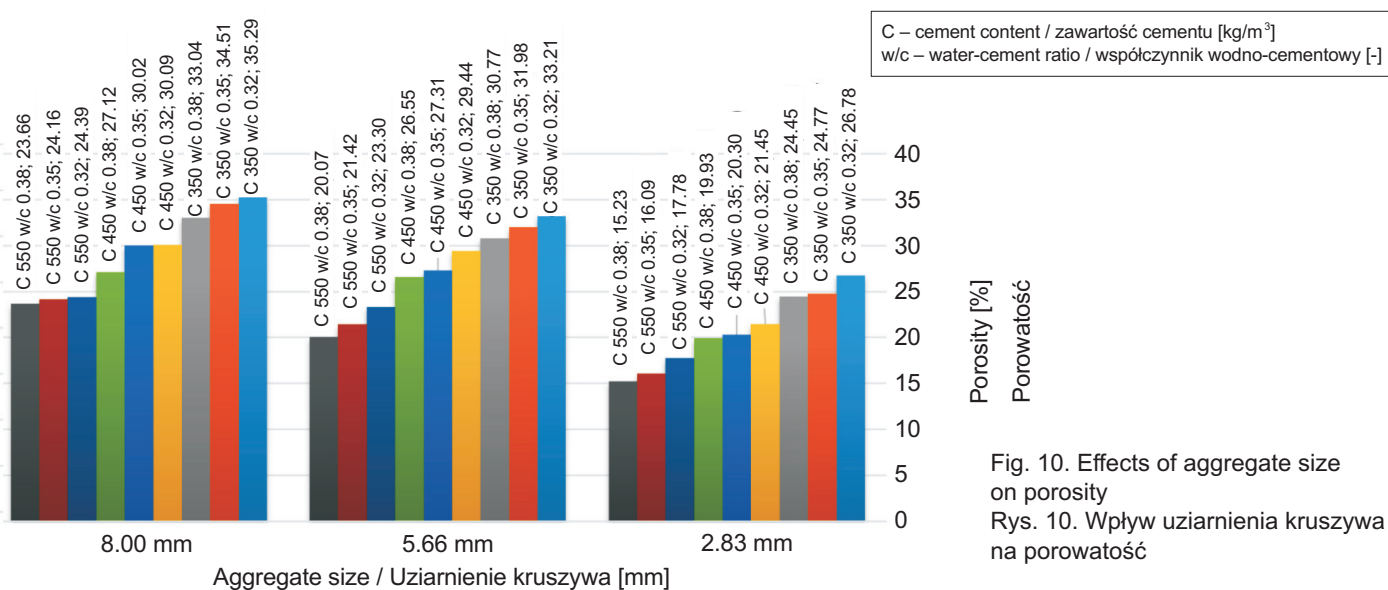


Fig. 10. Effects of aggregate size on porosity
Rys. 10. Wpływ uziarnienia kruszywa na porowatość

5.3. WPŁYW SKŁADU MIESZANKI NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONU

Jak pokazano na Rys. 11, zawartość cementu ma istotny wpływ na wytrzymałość betonu porowatego. Najwyższą wartość (20,7 MPa) zmierzono dla próbki z kruszywem o uziarnieniu do 5,66 mm, współczynnikiem $w/c = 0,35$ oraz zawartością cementu 550 kg/m^3 . Określenie szybkości spadku wytrzymałości na ściskanie w miarę zmniejszania zawartości cementu stanowiło jeden z głównych celów niniejszej pracy. Pomiedzy próbkami o zawartości cementu 550 kg/m^3 a próbkami o zawartości cementu 350 kg/m^3 stwierdzono różnicę wytrzymałości na ściskanie wynoszącą ponad 55%.

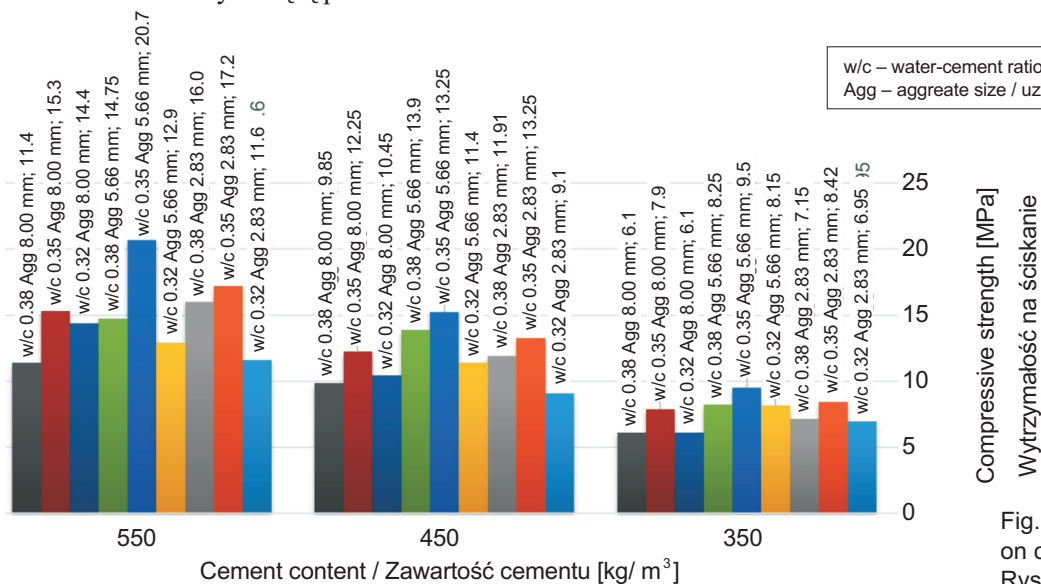


Fig. 11. Effects of cement content on compressive strength
Rys. 11. Wpływ zawartości cementu na wytrzymałość na ściskanie

Jak wynika z wykresu na Rys. 12, współczynnik w/c miał istotny wpływ na wytrzymałość na ściskanie betonu. Najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano dla próbek ze współczynnikiem w/c wynoszącym 0,35. W związku z tym przyjęcie współczynnika w/c na poziomie 0,35 jest zalecane w celu osiągnięcia wyższych wartości wytrzymałości na ściskanie.

Wyniki badań przedstawione na Rys. 13 pokazują, że zmiana uziarnienia kruszywa nie ma istotnego wpływu na wytrzymałość betonu przepuszczalnego. Niemniej jednak, wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskane dla próbek z kruszywem o uziarnieniu do 5,66 mm były nieco wyższe niż dla próbek z kruszywem o rozmiarach 2,83 mm i 8,00 mm.

Podsumowując, przy zawartości cementu 550 kg/m^3 uzyskano wyższą wytrzymałość betonu na ściskanie niż dla zawartości cementu 350 kg/m^3 . Ponadto współczynnik w/c równy 0,35 zapewnił lepszą wytrzymałość na ściskanie niż współczynniki 0,32 i 0,38.

5.3. INFLUENCE OF CONCRETE COMPOSITION ON COMPRESSIVE STRENGTH

Fig. 11 shows that an increase in cement content influences the strength of pervious concrete significantly. The highest value of 20.7 MPa was recorded for the sample with water-cement ratio of 0.35, aggregate size of 5.66 mm and cement content of 550 kg/m^3 . Determination of the rate of reduction in compressive strength with a decrease in cement content was one of the main objectives of this study. A difference in compressive strength of over 55% was noted between samples with 550 kg/m^3 and 350 kg/m^3 cement content.

As shown in Fig. 12, water-cement ratio influenced the values of strength significantly. The highest compressive strength values were observed for samples with 0.35 water-cement ratio. Consequently, the water-cement ratio of 0.35 is recommended in order to achieve higher compressive strength results.

The results shown in Fig. 13 reveal that a change in the aggregate size does not considerably affect the strength of pervious concrete. Nevertheless, compressive strength obtained for the samples made with 5.66 mm aggregate was slightly higher than that obtained for samples made with 2.83 mm and 8.00 mm aggregate.

In summary, cement content of 550 kg/m^3 resulted in higher compressive strength than 350 kg/m^3 . Moreover, compared to 0.32 and 0.38, the water-cement ratio of 0.35 provided the best performance of the concrete in terms of compressive strength.

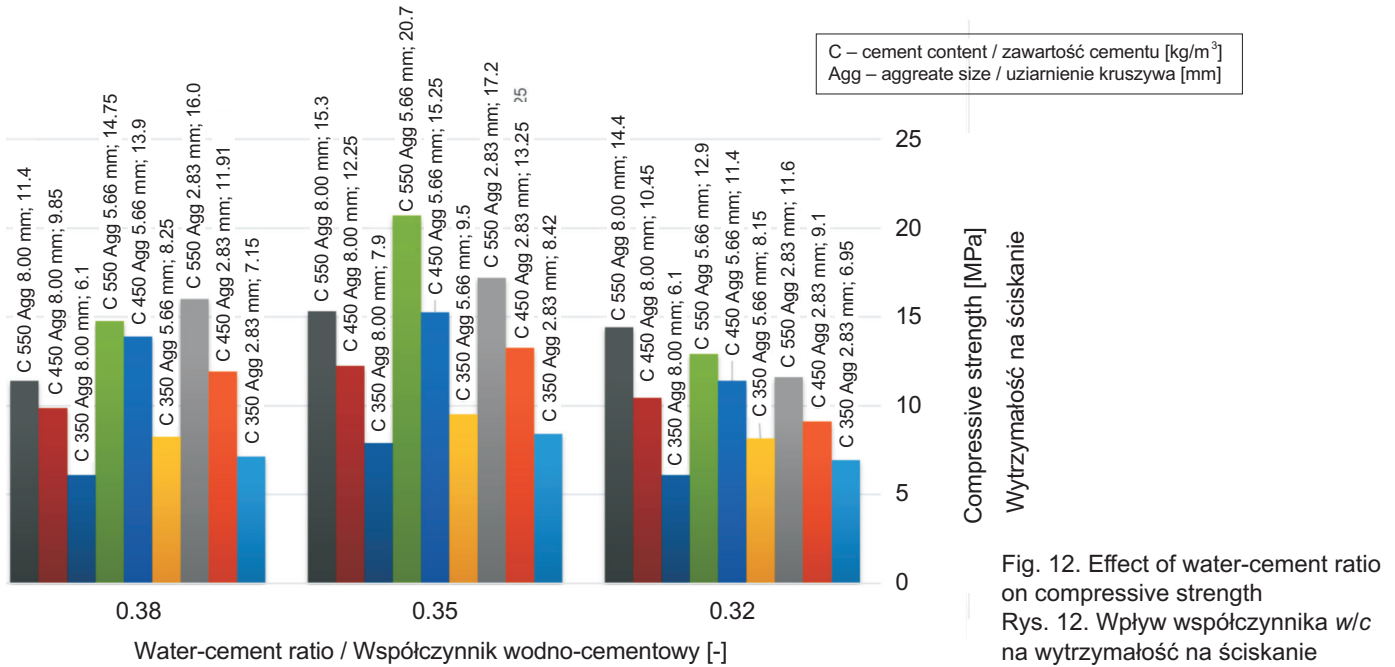


Fig. 12. Effect of water-cement ratio on compressive strength
Rys. 12. Wpływ współczynnika w/c na wytrzymałość na ściskanie

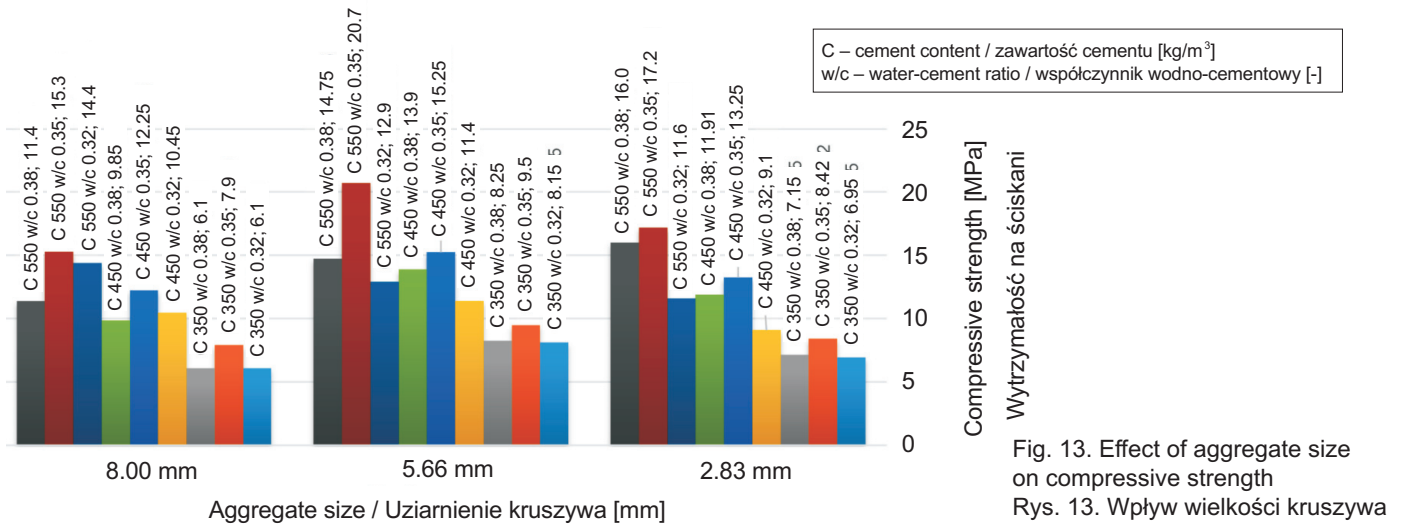


Fig. 13. Effect of aggregate size on compressive strength
Rys. 13. Wpływ wielkości kruszywa na wytrzymałość na ściskanie

6. WNIOSKI

1. Przy wzroście zawartości cementu od 350 kg/m³ do 550 kg/m³ nastąpił spadek przepuszczalności o ponad 50%. Prawdopodobnie wzrost zawartości zaczynu cementowego spowodował spadek porowatości, co w konsekwencji doprowadziło do redukcji przepuszczalności.
2. Zmiana współczynnika w/c nie miała istotnego wpływu na przepuszczalność.
3. Współczynnik filtracji obserwowany dla próbek z kruszywem o uziarnieniu do 8,00 mm był dwukrotnie wyższy niż dla próbek z kruszywem o uziarnieniu 2,83 mm. Ponieważ

6. CONCLUSIONS

1. When the cement content increased from 350 kg/m³ to 550 kg/m³, permeability decreased by more than 50 percent. Probably the increased amount of cement paste reduced the porosity and, consequently, led to a significant decrease in permeability.
2. The change in the water-cement ratio did not have a substantial effect on permeability.
3. Permeability rates observed for samples made with 8.00 mm aggregate were two times greater than for samples with 2.83 mm aggregate. Since there was no

mieszanki nie zawierały piasku, zastosowanie kruszywa o grubszej frakcji przekładało się na wyższą porowatość, prowadząc do istotnego wzrostu przepuszczalności.

4. Najwyższą porowatość (35,29%) odnotowano dla próbek z kruszywem do 8,00 mm, współczynnikiem w/c równym 0,32 oraz zawartością cementu 350 kg/m^3 .
5. Na podstawie porównania wyników można stwierdzić, że przy zmianie kruszywa o uziarnieniu do 8,00 mm na kruszywo do 2,83 mm następowała redukcja porowatości betonu o 30-40%.
6. Potwierdzono spadek wytrzymałości betonu na ściskanie w miarę zmniejszania zawartości cementu. Pomiedzy próbkami o zawartości cementu 550 kg/m^3 a próbkami o zawartości cementu 350 kg/m^3 stwierdzono różnicę wytrzymałości na ściskanie wynoszącą ponad 55%.
7. Beton z kruszywem o uziarnieniu 5,66 mm charakteryzowały się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż beton z kruszywem o uziarnieniu do 2,83 mm i 8,00 mm. W celu osiągnięcia wyższej wytrzymałości na ściskanie zalecany jest współczynnik w/c równy 0,35.

INFORMACJE DODATKOWE

Autorzy dziękują Irańskiej Fundacji Elit Narodowych oraz Uniwersytetowi w Araku za umożliwienie realizacji badań opisanych w niniejszym artykule.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Mackiewicz P., Szydło A., Krawczyk B.: Influence of the construction technology on the texture and roughness of concrete pavements. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 2, 2018, 111-126, DOI: 10.7409/rabdim.018.007
- [2] Yang J., Jiang G.: Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*, **33**, 3, 2003, 381-386, DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00966-3
- [3] Scholz M., Grabowiecki P.: Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, **42**, 11, 2007, 3830-3836, DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.11.016
- [4] Tennis P.D., Leming M.L., Akers D.J.: Pervious concrete pavements. Portland Cement Association, Skokie, 2004
- [5] Shu X., Huang B., Wu H., Dong Q., Burdette E.G.: Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, **25**, 8, 2011, 3187-3192, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002
- [6] Lian C., Zhuge Y.: Optimum mix design of enhanced permeable concrete – an experimental investigation. *Construction and Building Materials*, **24**, 12, 2010, 2664-2671, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057
- [7] Nguyen D.H., Sebaibi N., Boutouil M., Leleyter L., Baraud F.: A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*, **73**, 2014, 271-282. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088
- [8] Schulze J.: Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, **29**, 6, 1999, 909-915, DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00060-5
- [9] Kanadasan J., Razak H.A.: Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing. *Materials & Design*, **56**, 2014, 9-19, DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.086
- [10] Zaetang Y., Wongsas A., Sata V., Chindaprasirt P.: Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, **48**, 2013, 585-591, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.077
- [11] ASTM C192 / C192M-19. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, 2019

sand used in the mixes, higher aggregate size contributed to higher porosity, leading to a considerable increase in the value of permeability.

4. The highest value of porosity (35.29%) was noted for the sample made from 8.00 mm aggregate, with water-cement ratio of 0.32 and cement content of 350 kg/m^3 .
5. Upon comparison of the results, it can be stated that a 30-40% reduction in porosity was noted for samples with 2.83 mm aggregate vs. those with 8.00 mm aggregate.
6. The reduction in compressive strength of concrete was confirmed as the cement content decreased. A difference in compressive strength of over 55 percent was noted between samples with cement content of 550 kg/m^3 and 350 kg/m^3 .
7. Samples made with 5.66 mm aggregate were characterized by higher compressive strength than those made with 2.83 mm and 8.00 mm aggregate. The water-cement ratio of 0.35 is recommended in order to achieve higher compressive strength.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Iran's National Elites Foundation fund and the Arak University for providing the opportunity to realize this research project.

- [12] *Nguyen D.H., Boutouil M., Sebaibi N., Leleyter L., Baraud F.*: Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials*, **49**, 2013, 151-160, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.017
- [13] *Kuo W.T., Liu C.C., Su D.S.*: Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, **37**, 2013, 328-335, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.01.001
- [14] *Sata V., Wongs A., Chindaprasirt P.*: Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, **42**, 2013, 33-39, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.046
- [15] *Tho-in T., Sata V., Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C.*: Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **30**, 2012, 366-371, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.028
- [16] *Mishra K., Zhuge Y., Karunasena K.*: Clogging mechanism of permeable concrete: A review. *Concrete 2013: Understanding Concrete*, Gold Coast, Australia, 2013, <https://eprints.usq.edu.au/24554/> (25.03.2022)
- [17] *Neithalath N., Sumanasooriya M. S., Deo O.*: Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials Characterization*, **61**, 8, 2010, 802-813, DOI: 10.1016/j.matchar.2010.05.004
- [18] *Sonebi M., Bassuoni M.*: Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. *Construction and Building Materials*, **38**, 2013, 147-154, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.044
- [19] *Yahia A., Kabagire K.D.*: New approach to proportion pervious concrete. *Construction and Building Materials*, **62**, 2014, 38-46, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.025
- [20] *Haselbach L.M., Valavala S., Montes F.*: Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of Environmental Management*, **81**, 1, 2006, 42-49, DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.09.019
- [21] *Rehder B., Banh K., Neithalath N.*: Fracture behavior of pervious concretes: the effects of pore structure and fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, **118**, 2014, 1-16, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.01.015