

## Rola nanokrzemionki w betonie zawierającym kruszywo hematytowe i magnetytowe oraz węglík boru jako osłony przed promieniowaniem gamma

## Nanosilica role in concrete containing iron oxides aggregates and boron carbide as a shield against gamma rays

Majid Safamehr<sup>1</sup>, Mohsen Izadinia<sup>1</sup>, Seyed Hamid Hashemi<sup>2</sup>, Saeideh Koohestani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Arak University, Arak, Iran

<sup>3</sup>Department of Physics, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

\* Corresponding author: M. Izadinia, e-mail: [izadinia@iaun.ac.ir](mailto:izadinia@iaun.ac.ir)

### Streszczenie

W artykule opisano wyniki badań dwóch betonów ciężkich, pierwszy zawierający kruszywo hematytowe i drugi magnetytowe. Węglík boru wprowadzono jako zamiennik cementu w ilościach 2,5; 5 i 10% masowych. Następnie w tych mieszankach ilość cementu zmniejszono o 5% i zastąpiono nanokrzemionką. Zbadano także właściwości betonu: wytrzymałość na ściskanie, szybkość przejścia fali ultradźwiękowej i gęstość, a także napromieniowano próbki kobaltem 60, w celu określenia współczynnika tłumienia liniowego. Zastosowanie kruszyw zawierających tlenek żelaza, a zwłaszcza magnetyt, było korzystne dla wszystkich wymienionych właściwości, natomiast odwrotnie było w przypadku dodania do mieszanki węglíka boru. Dodatek nanokrzemionki skompensował spadek wytrzymałości betonu na ściskanie spowodowany dodatkiem węglíka boru, ale zmniejszył współczynnik tłumienia liniowego o około 4%. Jednak właściwości mieszanek zawierających węglík boru i nanokrzemionkę były zawsze lepsze niż w przypadku betonów zwykłych. W celu określenia współczynnika tłumienia liniowego przeprowadzono symulacje Monte Carlo, których wyniki okazały się zgodne z wynikami uzyskanymi w trakcie badań doświadczalnych.

**Słowa kluczowe:** hematyt, magnetyt, węglík boru, promienie gamma, osłony betonowe, nanokrzemionka

### Summary

Two families of heavy concrete were investigated in this project, the first containing hematite and the second magnetite aggregates. Boron carbide also replaced cement in mass of 2.5, 5 and 10%. Once again, in these compounds the content of cement was reduced by 5% and replaced by nanosilica. Such parameters as compressive strength, ultrasonic pulse velocity and density were investigated, and the specimens were irradiated with cobalt 60, to quantify the linear attenuation coefficient. Using iron ore aggregate, especially magnetite, was advantageous for all the above-mentioned parameters, while the opposite was true, when boron carbide was added to the mix. The addition of nanosilica compensated the decrease in compressive strength of concrete due to the presence of boron carbide, but reduced the linear attenuation coefficient by about 4%. However, the properties of the mixes containing boron carbide and nanosilica, were always better than those of conventional concretes. To quantify the linear attenuation coefficient, Monte Carlo simulations were performed, and their results turned out to be in good agreement with those obtained by the experimental measurements.

**Keywords:** hematite, magnetite, boron carbide, gamma rays, concrete shields, nanosilica

## 1. Wprowadzenie

Właściwości ochrony przed promieniowaniem betonu różnią się w zależności od jego składu. Dotychczas badano różne rodzaje betonu osłonowego z kruszywem z rud żelaza i dodatkami naturalnymi lub syntetycznymi, w tym związkami boru (1-18). Kruszywa zawierające związki żelaza są uważane za dobry składnik w betonach osłonowych ze względu na odpowiednią liczbę atomową żelaza. Jest ona skutecznym czynnikiem ekranującym w ekspozycji na promienie gamma i neutrony prędkie. Ponadto, są korzystne węgiel o dużym przekroju czynnym na rozpraszanie przy pochłanianiu neutronów prędkich i bor o dużym przekroju czynnym na wychwytywanie przy pochłanianiu neutronów powolnych i termicznych. Bor wykazuje zdolność do wytwarzania wtórnych i mało przenikliwych promieni gamma, które po wychwyceniu neutronu sprawiają, że węgiel boru jest materiałem odpowiednim do stosowania jako osłona przed neutronami. Ponadto, zgodnie z tablicą 1 zamieszczoną w normie ASTM C637, są to materiały zalecane do stosowania w ochronie przed promieniowaniem. Dlatego też jednoczesne zastosowanie kruszywa z rud żelaza i węgla boru wydaje się bardzo skuteczne w konstruowaniu jednowarstwowej osłony betonowej, przed promieniami gamma i wiązkami neutronów (19-21).

W tym kontekście szczególne znaczenie mają właściwości mechaniczne i mikrostrukturalne betonu osłonowego. Niektóre wcześniejsze badania, oprócz pozytywnego efektu ochronnego stosowania w betonie związków boru, w tym węgla boru, donosiły o pogorszeniu wytrzymałości na ściskanie i powstawaniu zwiększonej porowatości (14,16,17). Dlatego też wydaje się zasadne zastosowanie odpowiedniego dodatku w celu polepszenia właściwości mechanicznych betonu osłonowego, zawierającego węgiel boru.

Dotychczas badano różne dodatki do betonów osłonowych, o interesujących właściwościach ochronnych i mechanicznych, m.in. pył krzemionkowy, popioły lotne, żużle przemysłowe oraz odpady niebezpieczne dla środowiska (22-32). Wprowadzenie odpowiednio dobranego nanododatku może prowadzić do zmniejszenia porowatości uwodnionego zaczynu cementowego. Cząstki nanokrzemionki mają dużą twardość oraz mogą reagować z wodorotlenkiem wapnia, dzięki czemu mogą powodować modyfikację procesu hydratacji cementu. Dlatego zastosowanie nanokrzemionki może poprawić właściwości mechaniczne betonu ochronnego. Prowadzone są również badania nad zastosowaniem tego materiału w zwykłym betonie (33-39).

Dla ochrony przed promieniowaniem, zwłaszcza zawierającym promienie gamma i neutrony, często stosuje się osłony wielowarstwowe. W związku z tym każda warstwa ochronna ma określoną funkcję tłumienia. W badaniach tych, w celu poprawy tłumienia promieni gamma i neutronów prędkich, dwa rodzaje kruszyw z rud żelaza zastąpiły zwykłe kruszywa w betonie. Z drugiej strony, węgiel boru zastąpił część cementu w różnych proporcjach, aby zwiększyć zdolność betonu do tłumienia neutronów termicznych. W związku z powyższym można stwierdzić, że głównym celem

## 1. Introduction

The radiation protection properties of concrete vary depending on its composition. So far, various types of concrete with aggregates and natural or synthetic additives, have been investigated as shielding concrete, including iron aggregates and boron compounds (1-18). Iron ore aggregates are considered an effective option in shielding concrete because of the appropriate atomic number of iron, which is an effective factor in exposure to gamma rays and fast neutrons. Also, carbon with a high scattering cross-section in the absorption of fast neutrons and boron with a high capture cross-section in the absorption of slow and thermal neutrons, are favorable. The ability to produce secondary and low-penetration gamma rays after neutron capture, makes boron carbide a matter suitable for use as neutron shielding. In addition, according to Table 1 inserted in the ASTM C637 standard, these items are recommended materials for use in radiation protection. Therefore, the simultaneous use of iron oxide aggregates and boron carbide, seems to be very effective in constructing of the single layer concrete shield, against gamma rays and neutron beams (19-21).

Within this context, the mechanical and microstructural properties of the shielding concrete have particular importance. Some previous studies, in addition to the positive protective effect of using boron compounds such as boron carbide in concrete, have reported the reduction of compressive strength and the creation of the porosity increase (14,16,17). Therefore, it seems reasonable to use a suitable additive to improve and enhance the mechanical properties of shielding concrete, containing boron carbide.

To date, various additives in shielding concrete have been studied with interesting protective and mechanical properties, including silica fume, fly ash, industrial slag and wastes, hazardous for the environment (22-32). Incorporation of properly selected nano-additive may cause a reduction of porosity, of hydrated cement paste. Nano-silica particles have high hardness and also can react with calcium hydroxide and due to this can be effective in the modification of cement hydration process. Therefore, the use of nanosilica can enhance the mechanical properties of protective concrete. Research has also been carried out on the use of this material in concrete (33-39).

For radiation protection, especially when gamma rays and neutrons are present, it is often common to apply multilayer shields. As such, each layer of protection has a particular attenuation function. In this research, to improve the attenuation of gamma rays and fast neutrons, two types of iron-bearing aggregates replaced the ordinary aggregates in concrete, separately and jointly. On the other hand, boron carbide replaced cement at different percentages to increase the capability of concrete to attenuate the thermal neutrons. Accordingly, it may be claimed that investigating the feasibility of making a concrete shield which can concurrently attenuate gamma rays and thermal neutrons in one layer, is the chief objective of this study.

In this study, the effect of boron carbide on the mechanical properties of heavy concrete, was investigated. It will be determined

niniejszej pracy jest zbadanie możliwości wykonania betonowej osłony, która będzie jednocześnie tłumić promieniowanie gamma i neutrony termiczne, w jednej warstwie.

W niniejszej pracy badano wpływ węgla boru na właściwości mechaniczne betonu ciężkiego. Określono, czy dodatek węgla boru do betonu ciężkiego, w celu jednoczesnej ochrony przed promieniowaniem gamma i neutronami termicznymi, będzie miał wpływ na właściwości mechaniczne wykonanego betonu. Następnie, poprzez dodatek nanokrzemionki do mieszanki betonowej, badano jej rolę w poprawie właściwości mechanicznych betonu, na które wpływ ma dodatek węgla boru. W dalszej kolejności, za pomocą badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych, zmierzono wpływ dodatku tych substancji na tłumienie promieniowania gamma.

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Materiały

Kruszywo hematytowe o zawartości hematytu 47% i kruszywo magnetytowe o zawartości magnetytu 60%, oba rozdrobnione do wielkości cząstek 9,5 mm lub mniejszych, uzyskano z kopalni Kooch Serahan, położonej 15 km na południe od miasta Kaszan. Zwykłe kruszywo o tej samej wielkości otrzymano z kopalni Kohan Khak, położonej 50 km na południowy zachód od miasta Ardestan, w prowincji Isfahan, również rozdrobniono i przygotowano. W celu wyznaczenia krzywych uziarnienia kruszywa, przedstawionych na rys. 1, oraz ich właściwości fizycznych podanych w tabelicy 1, zastosowano metody podane przez normy ASTM C33, ASTM C127, ASTM C128, ASTM C637 oraz punkt 3.3 normy ACI 349-06. Skład chemiczny kruszyw podano w tabelicy 2. Cement typu I o wytrzymałości normowej 32,5 MPa zgodnie z normą ASTM C150 i punktem 3.2.1 normy ACI 349-06 otrzymano z cementowni Isfahan Cement Factory położonej na zachód od miasta Isfahan. Skład chemiczny cementu podano w tabelicy 2. Węgiel boru

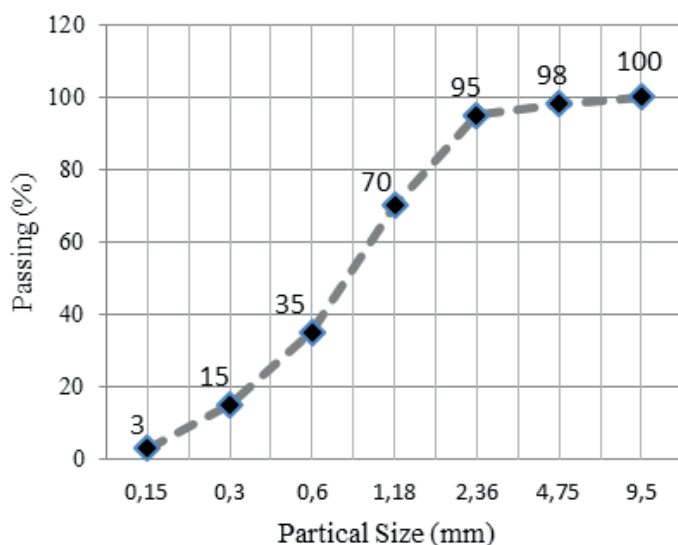
if the addition of boron carbide to heavy concrete, for the simultaneous protection against gamma rays and thermal neutrons, will have an effect on the mechanical properties of the concrete. Then, by the addition of nanosilica to the concrete mix, its role in improving the mechanical properties of concrete affected by the addition of boron carbide, was studied. Subsequently, the effect of the presence of these substances on the attenuation of gamma rays was measured, using experiments and computer simulations.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials

Hematite aggregate with the content of 47% and magnetite aggregate with the content of 60%, both crushed to a particle size 9.5 mm or smaller, were obtained from the Kooch Serahan mine located 15 km south of Kashan city. Ordinary aggregate of the same size, from Kohan Khak mine located 50 km southwest of Ardestan city, Isfahan province, was also crushed and prepared. The aggregate grading curves shown in Fig. 1 and their physical properties as given in Table 1, is according to the standards of ASTM C33, ASTM C127, ASTM C128, ASTM C637, and Section 3.3 of ACI 349-06. The chemical composition of aggregates is given in Table 2. The cement of type I with an ultimate strength of 32.5 MPa was obtained from the Isfahan Cement Factory located west of Isfahan city, following the standard principles of ASTM C150 and Clause 3.2.1 of ACI 349-06. The chemical composition of cement is given in Table 2.

Boron carbide was obtained from the Iranian Scientific Company of Pishro Ceramic Mehr with a particle size smaller than 7  $\mu\text{m}$  and the specifications given in Table 2. The nanosilica was obtained from the Hydro Chemistry Company located in Tehran, with a maximum particle size of 40 nm. Water consumption was also considered according to ASTM D1129 and Clause 3.4 of ACI 349-06. The water was taken from the public water system of Isfahan city.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia kruszywa

Fig. 1. Aggregates grading curve

Tablica 1 / Table 1

### WŁAŚCIWOŚCI SUROWCÓW

#### PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Materials/Materiały	Density / Gęstość, g/cm <sup>3</sup>	Water absorption Nasiąkliwość, %
Ordinary aggregate Kruszywo zwykłe	2.6	3.07
Hematite aggregate Kruszywo hematytowe	4.6	3.92
Magnetite aggregate Kruszywo magnetytowe	5	1.79
Boron carbide Węgiel boru	2.52	---
Cement	3.15	---
Nanosilica Nanokrzemionka	1.2	---

Tablica 2 / Table 2

## SKŁAD CHEMICZNY SUROWCÓW

## CHEMICAL COMPOSITION OF THE MATERIALS

Component Składnik	Ordinary aggregate Kruszywo zwykłe	Hematite aggregate Kruszywo hematytowe	Magnetite aggregate Kruszywo magnetytowe	Boron carbide Węglik boru	Cement
SiO <sub>2</sub>	49.285	18.676	7.507	1.151	17.521
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.63	3.76	1.15	---	2.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.69	46.819	59.677	4.863	4.205
CaO	18.714	9.423	11.075	0.629	66.96
Na <sub>2</sub> O	1.391	0.338	0.18	0.043	0.234
MgO	2.537	7.117	12.191	---	2.062
K <sub>2</sub> O	1.214	0.321	0.05	---	1.013
TiO <sub>2</sub>	0.691	0.461	0.086	0.057	0.228
MnO	0.057	0.615	0.321	0.047	0.443
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.093	0.059	0.03	0.016	0.18
LOI	13.05	11.9	7.65	---	1.1

otrzymano z Iranian Scientific Company of Pishro Ceramic Mehr. Wielkość ziaren węgla była mniejsza od 7  $\mu\text{m}$ , zaś jego skład podano w tablicy 2. Nanokrzemionkę, o maksymalnej wielkości cząstek 40 nm, otrzymano z Hydro Chemistry Company z siedzibą w Teheranie. Uwzględniono również zużycie wody zgodnie z ASTM D1129 i punktem 3.4 normy ACI 349-06. Woda została pobrana z publicznego wodociągu miasta Isfahan.

### 2.1.1. Składy mieszanek

Przedstawione w tablicy 3 składy mieszanek zaprojektowano według metod objętościowych i zgodnie z zaleceniami ACI 211. Metodą prób i błędów ustalono stosunek wodno-cementowy i zawartość cementu na poziomie, odpowiednio 0,5 i 414  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Cztery mieszanki zawierały kruszywo hematytowe, a pozostałe cztery mieszanki kruszywo magnetytowe. Węglik boru zastąpił cement w ilości do 10% masy cementu. Powyższych 8 mieszanek zmodyfikowano następnie, zastępując 5% cementu nanokrzemionką. Jako wzorzec zbadano również recepturę mieszanki ze zwykłymi kruszywami krzemionkowymi, bez dodatków. Oznaczenia skrótów poszczególnych mieszanek przedstawiono w tablicy 3. Należy zaznaczyć, że przy przygotowaniu próbek uwzględniono wodozadność kruszyw i dodatków.

### 2.1.2. Przygotowanie próbek

Próbki zaformowano i pielęgnowano zgodnie z wytycznymi norm ASTM C192 i ACI 349-06 oraz metodą wskazaną przez innych badaczy (6, 20). Mieszanki przygotowano w mieszarce o pojemności 356  $\text{dm}^3$ . Najpierw wymieszano suche kruszywo, a następnie dodano cement i mieszano przez 2 minuty. Po tym czasie dodano 80% wymaganej ilości wody i mieszano jeszcze przez 1,5 minuty. Następnie dodano pozostałe 20% wymaganej wody i kontynuowano proces mieszania przez kolejne 5 minut. Należy zauważyć, że nanokrzemionka była najpierw mieszana z wodą w wirówce szybkoobrotowej, a następnie tak powstałą zawiesinę dodano do mieszanki.

### 2.1.1. Mix Design

The mix proportions presented in Table 3 were obtained according to the volumetric methods and in accordance with the recommendations of ACI 211. After the trial and error process, the water-cement ratio and cement content were set at 0.5 and 414  $\text{kg}/\text{m}^3$ , respectively. Four mixes contained hematite aggregates, and the other four mixes contained magnetite aggregates. Boron carbide replaced cement from up to 10% by cement mass. These 8 mixes were once again treated by replacing 5% of cement with nanosilica. A mix design with ordinary siliceous aggregate and no additives was also investigated as a reference. The designation of each compound are given in Table 3. It should be noted that the water absorption of aggregates and additives was considered in manufacturing the samples.

### 2.1.2. Preparation of samples

Samples were cast and cured in accordance with the principles of ASTM C192 and ACI 349-06 and the method indicated by other researchers (6,20).

A mixer with a capacity of 356  $\text{dm}^3$  was used to prepare the samples. First, the dry aggregates were mixed; then the dry cement was added and mixed for 2 minutes. Then, 80% of the required amount of water was added, and mixing was continued for another 1.5 minutes. The remaining 20% of the water was added, and the mixing process was continued for another 5 minutes. It should be noted that nanosilica was first mixed with the water inside a high-speed centrifuge, and later the suspension was added to the mix.

The concrete was cast into 10 × 10 × 10 and 5 × 5 × 5 cm molds and compacted on a vibrating table. The molds were covered with nylon and maintained in laboratory conditions for 24 hours. Subsequently, the samples were immersed in water at the temperature of 18-21°C, for 27 days. After that, samples were taken out of the water, and 10 × 10 × 10 cm samples remained in the laboratory

Przygotowaną mieszankę umieszczono w formach o wymiarach 10 × 10 × 10 i 5 × 5 × 5 cm i zagęszczono na stole wibracyjnym. Formy przykryto nylonem i utrzymywano w warunkach laboratoryjnych przez 24 godziny. Próbki były przechowywane w wodzie w temperaturze 18-21°C przez 27 dni. Następnie próbki wyjęto z wody, a próbki o wymiarach 10 × 10 × 10 cm pozostawiono w laboratorium, do czasu wysuszenia ich powierzchni i wykorzystania do badań. Z każdej mieszanki przygotowano trzy próbki do badań wytrzymałości na ściskanie oraz trzy próbki do badań prędkości przejścia fali ultradźwiękowej i gęstości. Próbki o wymiarach 5 × 5 × 5 cm umieszczono w suszarce w temperaturze 105°C na 24 godziny w celu całkowitego wysuszenia i przygotowania do napromieniowania promieniowaniem gamma.

until their surface was dried and they were used for testing. Three samples were prepared from each mix for compressive strength tests, and three samples were prepared for ultrasonic pulse velocity and density testing. The 5 × 5 × 5 cm samples were placed in an oven at 105°C for 24 hours to be completely dried and prepared for gamma irradiation.

## 2.2. Methods

### 2.2.1. Compressive strength

The tests were carried out on concrete at the age of 28 days using a 2000 kN press with a loading rate of 2.5 kN/s on water saturated 10 × 10 × 10 cm cube samples, with dry surfaces. The principles of BS1881, including Part 116 of the standard, were observed

Tablica 3 / Table 3

#### SKŁAD MIESZANEK

#### MIXES COMPOSITION

Mixes composition / Skład mieszank	Designation Oznaczenie	Aggregate Kruszywo, kg/m <sup>3</sup>	Cement, kg/m <sup>3</sup>	Water Woda, kg/m <sup>3</sup>	Boron car- bide Węglik boru, kg/m <sup>3</sup>	Nanosilica Nanokrze- mionka, kg/m <sup>3</sup>
Ordinary aggregate / Kruszywo zwykłe	C	1254	414	207	---	----
Hematite aggregate / Kruszywo hematytowe	H	1584	414	207	---	----
Hematite / Hematyt+ 2.5% Boron carbide / Węglik boru	H2.5	1584	403.65	207	10.35	----
Hematite / Hematyt+ 5% Boron carbide / Węglik boru	H5	1584	393.3	207	20.7	----
Hematite / Hematyt+ 10% Boron carbide / Węglik boru	H10	1584	372.6	207	41.4	----
Magnetite aggregate / Kruszywo magnetytowe	M	1914	414	207	---	----
Magnetite / Magnetyt+ 2.5% Boron carbide / Węglik boru	M2.5	1914	403.65	207	10.35	----
Magnetite / Magnetyt+ 5% Boron carbide / Węglik boru	M5	1914	393.3	207	20.7	----
Magnetite / Magnetyt+ 10% Boron carbide / Węglik boru	M10	1914	372.6	207	41.4	----
Hematite aggregate + NanoSilica / Kruszywo hematytowe + Nanokrzemionka	HN	1584	393.3	207	---	20.7
Hematite / Hematyt + 2.5% Boron carbide / Węglik boru + NanoSilica / Nanokrzemionka	HN 2.5	1584	382.95	207	10.35	20.7
Hematite / Hematyt + 5% Boron carbide / Węglik boru + NanoSilica / Nanokrzemionka	HN 5	1584	372.6	207	20.7	20.7
Hematite / Hematyt + 10% Boron carbide / Węglik boru + NanoSilica / Nanokrzemionka	HN 10	1584	351.9	207	41.4	20.7
Magnetite aggregate + NanoSilica / Kruszywo magnetytowe + Nanokrzemionka	MN	1914	393.3	207	---	20.7
Magnetite / Magnetyt + 2.5% Boron carbide / Węglik boru + NanoSilica / Nanokrzemionka	MN 2.5	1914	382.95	207	10.35	20.7
Magnetite / Magnetyt + 5% Boron carbide / Węglik boru + NanoSilica / Nanokrzemionka	MN 5	1914	372.6	207	20.7	20.7
Magnetite / Magnetyt + 10% Boron carbide / Węglik boru + NanoSilica / Nanokrzemionka	MN 10	1914	351.9	207	41.4	20.7

## 2.2. Metody

### 2.2.1. Wytrzymałość na ściskanie

Badania przeprowadzono na betonie dojrzewającym 28 dni, przy użyciu prasy o maksymalnym nacisku 2000 kN i prędkości obciążania 2,5 kN/s, nasyconych wodą próbkach w kształcie sześcianu, o wymiarach 10 × 10 × 10 cm, o suchej powierzchni. Podczas przeprowadzania tych pomiarów przestrzegano wytycznych zawartych w normie BS1881, w tym w części 116 normy. Wyniki są średnią z badań przeprowadzonych na trzech próbkach.

### 2.2.2. Prędkość impulsu ultradźwiękowego (UPV)

Wykonanie doświadczenia polegającego na pomiarze prędkości impulsu ultradźwiękowego jest dobrą i łatwą metodą na określenie jakości betonu (20). Badanie przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C597. Częstotliwość impulsów, przekazywanych do próbek betonu, wynosiła 55 KHz. Grubość warstwy betonu, przez którą przechodził impuls wynosiła 10 cm, a czas transmisji impulsu przy tej grubości, mierzono w mikrosekundach z dokładnością do 0,1 mikrosekundy. Podczas pomiarów temperatura w laboratorium wynosiła 23 °C. Podane liczby zostały uśrednione dla trzech próbek betonu, o wymiarach 10 × 10 × 10 cm.

### 2.2.3. Gęstość

Suche próbki zważono na wadze o dokładności 0,01 g w celu zmierzenia gęstości, którą następnie obliczono dzieląc otrzymaną liczbę przez objętość zmierzona suwmiarką, o dokładności 0,1 mm. Przedstawione wyniki są średnią z badań przeprowadzonych na trzech próbkach.

### 2.2.4. Pomiar tłumienia promieniowania gamma

Do pomiaru masowego współczynnika tłumienia próbek betonu użyto źródła Co-60 o aktywności 1 Curie [ci]. Źródło to emituje fotony o dwóch energiach: 1,173 MeV i 1,332 MeV. W tym badaniu, foton o wyższej energii, 1,332 MeV, stanowił podstawę pomiaru. Zastosowano detektor NaI [TI] o średnicy 2 cali. Do sporządzenia widm gamma użyto analizatora wielokanałowego [MCA] oraz oprogramowania DAS Version 2.1 Beta. Próbki betonu napromieniowywano przez dwie minuty, a geometrię stanowiska pokazano na rys. 2.

Zastosowano następującą zależność (20):

$$I = I_0 e^{-\mu_m(\rho \cdot x)} \quad (1)$$

gdzie:  $I_0$  to całkowita liczba fotonów wyemitowanych przez źródło,  $I$  to liczba fotonów przechodzących przez grubość warstwy betonu,  $x$  to grubość próbek betonu w cm,  $\rho$  to gęstość w g/cm<sup>3</sup>, a  $\mu_m$  to masowy współczynnik tłumienia w cm<sup>2</sup>/g. Z każdego betonu przygotowano cztery kostki o wymiarach 5 × 5 × 5 cm, do napromieniowania. Tak więc w celu sporządzenia wykresu (zależność pomiędzy  $I$  i  $\rho$

while carrying out this test. The report presented was based on the average of the tests carried out on three samples.

### 2.2.2. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Performing an experiment for determining ultrasonic pulse velocity is a good and easy way to determine the quality of concrete (20). This experiment was performed in accordance with ASTM C597 rules. The frequency of pulses transmitted to the concrete samples was 55 KHz. The thickness of the concrete layer, through which the pulse passed was 10 cm, and the pulse transmission time at this thickness was measured in microseconds, with an accuracy of 0.1 microsecond. The laboratory temperature was set at 23°C during the experiment. The reported numbers were averaged over three 10 × 10 × 10 cm concrete samples.

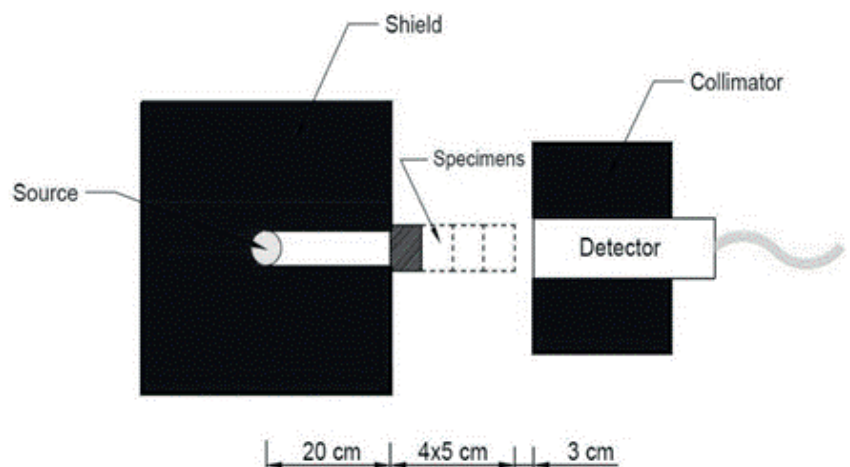
### 2.2.3. Density

Dry samples were weighed using a scale with a precision of 0.01 g to measure density, which was then calculated by dividing the resulting number by the volume measured by a calliper, with the precision of 0.1 mm. The report presented was based on the average of the tests carried out on three samples.

### 2.2.4. Gamma Rays Attenuation Measurement

A Co-60 source with 1 Curie [ci] activity was used to measure the mass attenuation coefficient of the concrete samples. This source emits photons with two energies of 1.173 MeV and 1.332 MeV. In this study, the higher energy photons, 1.332 MeV, were the basis of measurement. The detector used was NaI[TI] with a diameter of 2 inches. The multi-channel analyzer [MCA] and DAS Version 2.1 Beta software were used to draw the gamma spectra. The concrete samples were irradiated for two minutes, and this geometry of setup is shown in Fig. 2.

The following relation was used (20):



Rys. 2. Schemat stanowiska do badania masowego współczynnika tłumienia promieniowania gamma

Fig. 2. Schematic view of gamma-ray irradiation set up

x) dla każdego składu mieszanki, oprócz  $I_0$ , określono również cztery dodatkowe punkty. Następnie wybrano najlepszą funkcję w programie MATLAB, przedstawioną w postaci równania (1) i dopasowano do tych punktów, aby uzyskać jak najdokładniejsze  $\mu_m$ . Należy zaznaczyć, że wszystkie etapy napromieniania powtarzano trzykrotnie na różnych powierzchniach kostek betonowych i przyjęto średnią z uzyskanych wyników.

$\mu$  i HVL obliczono również przy zastosowaniu następujących wzorów (20):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{HVL} = \frac{\text{Ln}2}{\mu} \quad (3)$$

gdzie:  $\mu$  jest liniowym współczynnikiem tłumienia w  $\text{cm}^{-1}$ , a HVL jest warstwą połowicznego osłabienia w cm. Dodatkowo przeprowadzono symulację Monte Carlo stosując oprogramowanie MCNP4C, w celu walidacji wyników eksperymentu.

### 3. Wyniki i omówienie

#### 3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie różnych mieszanek przedstawiono na rys. 3. Jak wynika z rys. 3, wytrzymałość na ściskanie próbki zawierającej kruszywo hematytowe wykazała niewielki wzrost o około 6%, w porównaniu do betonu z kruszywem zwykłym. Natomiast wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszywem magnetytowym znacznie wzrosła, o 53% w stosunku do betonu z kruszywem zwykłym. W praktyce może to być wyjaśnione procentową absorpcją wody i gęstością ziaren zgodnie z właściwościami fizycznymi podanymi w tablicy 1. Wytrzymałość na ściskanie próbek malała wraz ze wzrostem zawartości procentowej węgliku boru, tak że w próbkach zawierających kruszywo hematytowe z 5 i 10% zawartością węgliku boru wytrzymałość na ściskanie była nawet niższa, niż w próbce wykonanej ze zwykłego kruszywa. Tę tendencję spadkową zaobserwowano również w przypadku magnetytu, ale wytrzymałość na ściskanie była nadal wyższa niż w przypadku betonu z kruszywem zwykłym. Dokładniej można stwierdzić, że wraz ze wzrostem zawartości węgliku boru o 2,5, 5 i 10 % wytrzymałość na ściskanie próbek betonowych zawierających kruszywo hematytowe spadała odpowiednio o 3, 9 i 20 %. Obniżenie wytrzymałości na ściskanie próbek zawierających kruszywo magnetytowe nastąpiło również przy udziałach procentowych wynoszących odpowiednio 3, 6 i 13 %. Biorąc pod uwagę zawartość krzemu i wapnia wydaje się, że w betonie zawierającym węglik boru nastąpiło zmniejszenie zawartości tych dwóch pierwiastków, a w procesie hydratacji powstało mniej uwodnionego żelu C-S-H. W związku z tym można oczekiwać, że wytrzymałość na ściskanie ulegnie zmniejszeniu. Obniżenie wytrzymałości na ściskanie w wyniku dodania węgliku boru do betonu zostało również odnotowane przez innych badaczy (17).

$$I = I_0 e^{-\mu_m(\rho \cdot x)} \quad (1)$$

where:  $I_0$  is the total number of photons emitted by the source,  $I$  is the number of photons passing through the thickness of the concrete layer,  $x$  represents the thickness of the concrete sample in cm,  $\rho$  is the density in  $\text{g}/\text{cm}^3$ , and  $\mu_m$  is the mass attenuation coefficient in  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Four  $5 \times 5 \times 5$  cm cubes were prepared from each mix design for irradiation. These cubes were arranged in four stages between the source and the detector with concrete shield thicknesses of 5, 10, 15, and 20 cm, but the source and detector distance did not change in any case. Thus, in order to draw the diagram [between  $I$  and  $\rho \cdot x$ ] for each mix design, in addition to  $I_0$ , four additional points were also identified. Then, the best function in MATLAB software as presented in Eq. (1) was fitted to these points, to extract the most accurate  $\mu_m$  from this process. It should be noted that all irradiation steps were repeated three times on different faces of concrete cubes and the mean of data was considered.

$\mu$  and HVL were also calculated using the following relations (20):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{HVL} = \frac{\text{Ln}2}{\mu} \quad (3)$$

where:  $\mu$  is the linear attenuation coefficient in  $\text{cm}^{-1}$  and HVL is the half value layer in cm. In addition, Monte Carlo simulation was performed using MCNP4C software, to validate the results of the experiment.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Compressive strength

The compressive strength of various compounds is presented in Fig. 3. As shown in Fig. 3, the compressive strength of the sample containing hematite aggregates had a low increase about 6%, compared to that of ordinary aggregates concrete. However, compressive strength of magnetite aggregates concrete significantly increased, by about 53% compared to the ordinary aggregates concrete. In practice, this behaviour can be explained by the percentage of water absorption and apparent grains density, according to the physical properties given in Table 1. The compressive strength of the samples decreased by increasing the content of boron carbide, so that in samples containing hematite aggregates with 5 and 10% of boron carbide, the compressive strength was even lower than of the sample made with ordinary aggregates. This reduction trend was also observed in magnetite, but the compressive strength was still higher than that of the ordinary aggregates concrete. More accurately, it can be stated that with the increase of boron carbide by 2.5, 5 and 10 %, the compressive strength of concrete samples containing hematite aggregates dropped by 3, 9 and 20 %, respectively. This reduction in the compressive strength of the samples carrying magnetite aggregates also occurred with the

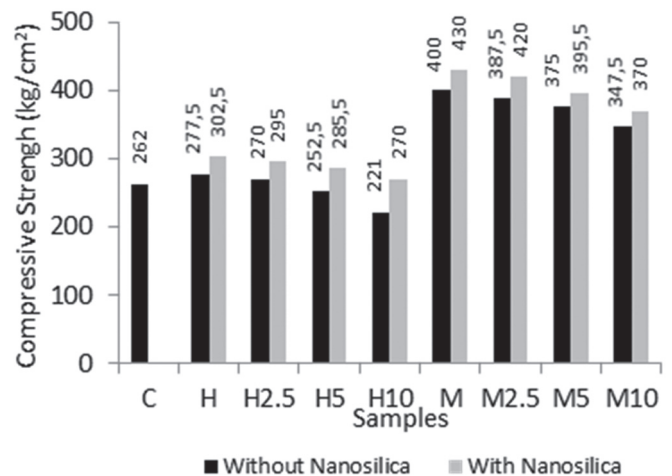
Ze względu na to, że wytrzymałość na ściskanie jest najważniejszą właściwością mechaniczną betonu pełniącego rolę konstrukcyjną, jej pomiar jest również konieczny w przypadku betonu osłonowego. Oczywiście, zgodnie z punktem 5-1-1 normy ACI349-06, zbyt duża wytrzymałość na ściskanie nie jest wymagana dla betonowej osłony, a wartość większa niż 2500 psi [17,5 MPa], jest wystarczająca. Tak więc wyniki tych badań spełniają wymagania konstrukcyjne dla osłon betonowych. W szczególności zaleca się stosowanie kruszyw magnetytowych, które znajdują najlepsze zastosowanie w budownictwie obiektów betonowych. Ponadto, jeśli węgiel boru jest stosowany w dużych ilościach w betonie osłonowym, należy kontrolować jego wytrzymałość na ściskanie. W tym przypadku, jeśli uzyskuje się małą wytrzymałość na ściskanie, wadę tę należy skompensować dodatkami, takimi jak mikrokrzemionka i nanokrzemionka.

Wytrzymałość na ściskanie próbek została zwiększona przez dodatek nanokrzemionki do mieszanki betonowej. W przypadku betonów z kruszywem hematytowym wzrost ten był większy niż w przypadku betonów zawierających kruszywo magnetytowe.

Dla bardziej szczegółowego porównania można podać, że po dodaniu nanokrzemionki do próbek betonowych zawierających kruszywo hematytowe o zawartości 2,5, 5 i 10% węgla boru, ich wytrzymałość na ściskanie wzrosła odpowiednio o 9, 9,5, 13 i 22%. Natomiast te same wartości dla próbek betonu zawierających kruszywo magnetytowe wynosiły odpowiednio 7,5, 8,5, 5,5 i 6,5%. W praktyce, dodatek nanokrzemionki zwiększa ilość żelu uwodnionych krzemianów wapnia i zmniejsza ilość wodorotlenku wapnia, powstającego w procesie hydratacji. Drobne cząstki nanokrzemionki wypełniają jednak również pory i zmniejszają porowatość betonu. Ogólnie rzecz biorąc, czynniki te zwiększają wytrzymałość na ściskanie. Wyniki wykazały, że dodanie nanokrzemionki do betonu eliminuje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, spowodowane dodatkiem węgla boru.

### 3.2. Szybkość przejścia fali ultradźwiękowej

Badanie to pozwala ocenić jakość betonu, w tym jednorodność, porowatość, pęknięcia i przepuszczalność (20). Na wykresie przedstawionym na rys. 4 pokazano prędkości impulsów ultradźwiękowych w badanych próbkach. Wyniki te oraz wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, wykazały odpowiednią zgodność i spójność. Oznacza to, że prędkość impulsu ultradźwiękowego w betonie zawierającym jako kruszywo tlenki żelaza, zwłaszcza magnetyt, była większa niż prędkość impulsu ultradźwiękowego w betonie ze zwykłym kruszywem, a zwiększenie udziału węgla boru powodowało zmniejszenie prędkości impulsu ultradźwiękowego w próbkach betonu. Zgodnie z wyjaśnieniami podanymi w poprzednim rozdziale, można oczekiwać powstawania większej ilości porów w próbkach betonowych dzięki zwiększeniu zawartości węgla boru. Jest to główną przyczyną zmniejszenia prędkości transmisji fal dźwiękowych przez próbki. Ze względu na to, że dźwięk z natury rzeczy pokonuje drogę wewnątrz materiału poprzez ciągłe zderzanie się z cząsteczkami materii, jest więc szybciej przenoszony w środowiskach o zwartej budowie i mniejszej zawartości wolnej przestrzeni.



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie badanych betonów

Fig. 3. Compressive strength of the samples

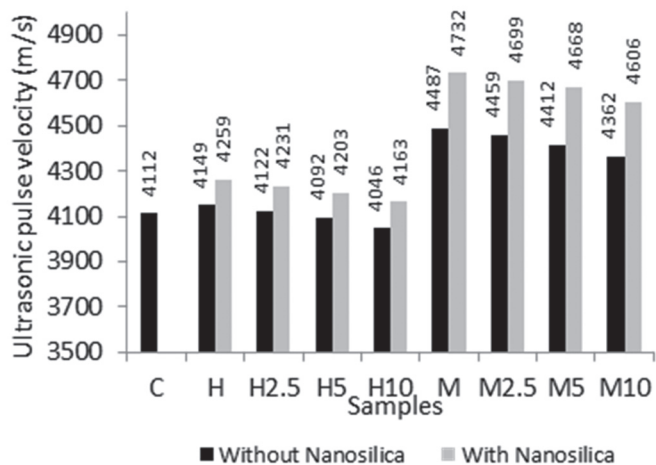
percentages of 3, 6 and 13, respectively. Considering the reduced content of cement in the concrete containing boron carbide, less hydrated calcium silicate gel was formed in the hydration process. As a result, compressive strength can be expected to decrease. Decreased compressive strength due to the use of boron carbide in concrete, has also been reported by other researchers (17).

Since compressive strength is the most important mechanical property of concrete having a structural role, it is also necessary to be measured for shielding concrete. Of course, according to clause 5-1-1 of the ACI349-06 regulation, too high compressive strength is not required for concrete shielding and greater than 2500 psi (17.5 MPa) is sufficient. Thus, the results of this research meet the structural need for concrete shielding. Especially magnetite aggregates are recommended for the best use in concrete construction. In addition, if boron carbide is used especially in large quantities in shielding concrete, the compressive strength must be controlled. In this case, if low compressive strength is achieved, this defect needs to be compensated with additives such as microsilica and nanosilica.

The compressive strength of the samples was increased by the addition of nanosilica to the concrete mix. This increase in concrete containing hematite aggregates, was higher than for the concrete containing magnetite aggregates.

For a more detailed comparison, we can mention that when nanosilica was added to the concrete samples containing hematite aggregates with the content of 2.5, 5, and 10% boron carbide, their compressive strength was increased by 9, 9.5, 13 and 22%, respectively. But the same values were for concrete samples that contained magnetite aggregates 7.5, 8.5, 5.5 and 6.5%, respectively. In practice, the content of nanosilica increases the formation of hydrated calcium silicate gel and reduces the content of calcium hydroxide formed by the hydration process. However, due to its fineness, nanosilica particles also fill the pores and reduces the concrete porosity. Overall, these factors increase the compressive strength. In fact, the results showed that the addition nanosilica to





Rys. 4. Szybkość przejścia fali ultradźwiękowej w badanych betonach

Fig. 4. Ultrasonic pulse velocity of the samples

Dodatek nanokrzemionki do mieszanki betonowej zwiększył prędkość przejścia impulsu ultradźwiękowego w badanych próbkach. Co więcej, prędkość impulsu ultradźwiękowego w próbkach betonu zawierających kruszywo hematytowe, wzrosła po dodaniu nanokrzemionki o około 3% i 110 m/s w porównaniu do przypadku, gdy beton nie zawierał nanokrzemionki w swoim składzie. Natomiast w próbkach betonu z kruszywem magnetytowym szybkość przejścia fali zwiększyła się o około 5,5% i 245 m/s. W innym porównaniu, nanokrzemionka zwiększała prędkość przejścia impulsu ultradźwiękowego w próbkach betonowych zawierających 10% węgla boru bardziej, niż w przypadku próbek betonowych bez węgla boru i nanokrzemionki. Oznacza to, że nanokrzemionka była w stanie całkowicie zniwelować efekt zwiększonej porowatości betonu, spowodowany przez dodatek węgla boru. Przyczyny są analogiczne z wymienionymi w części dotyczącej wytrzymałości na ściskanie.

### 3.3. Gęstość

Zgodnie z równaniami (1) i (2) można zaobserwować wpływ gęstości osłony betonowej na masowy i liniowy współczynnik tłumienia. Oczekuje się, że zastosowanie w betonie ciężkich kruszyw, a tym samym zwiększenie gęstości betonu, można zwiększyć liniowy współczynnik tłumienia betonu osłonowego. W międzyczasie, w przypadku konieczności zastosowania związków boru w konstrukcji osłony, konieczne jest zmierzenie ich wpływu na gęstość, a tym samym na liniowy współczynnik tłumienia betonu.

W tabelicy 4 przedstawiono gęstość próbek. Gęstość próbek zawierających kruszywo żelazne i węgiel boru porównano z próbkami betonu ze zwykłego kruszywa, w celu lepszego określenia zakresu i tendencji zmian, a różnicę wyrażono w tabeli w procentach. W przypadku kruszyw z hematytu i magnetytu gęstość była większa niż betonu z kruszyw zwykłych, przy czym wzrost ten dla kruszyw magnetytowych, wynoszący 42%, był większy niż dla kruszyw hematytowych, w których był rzędu 20%. Wynika to z różnicy w gęstości kruszyw. Zwiększenie zawartości procentowej węgla boru w próbkach, spowodowało zmniejszenie ich gęstości.

the concrete samples eliminate the reduction of the compressive strength, due to the presence and increase of boron carbide.

### 3.2. Ultrasonic Pulse Velocity

This test can show the quality of concrete, including uniformity, porosity, cracks, and permeability (20). The diagram plotted in Fig. 4 shows the ultrasonic pulse velocity in the samples. These results and the compressive strength test results showed good agreement and consistency. This means that, the ultrasonic pulse velocity in the concrete containing iron oxide aggregate, especially magnetite, were higher than the ultrasonic pulse velocity in the ordinary aggregates concrete and increasing the percentage of boron carbide decreased the ultrasonic pulse velocity in concrete samples. According to the explanation given in the previous section, it can be practically possible to expect formation of more pores in concrete samples by increasing the boron carbide content, and this is the main reason for the reduction of the velocity of sound waves transmission, through the samples. Because sound, due to its nature, passes the path inside the material by a continuous collision with the particles of matter and so it is transmitted more quickly in compact environments, with less free space.

The addition of nanosilica to the concrete mix increased the ultrasonic pulse velocity in the samples. More clearly, the ultrasonic pulse velocity in concrete samples containing hematite aggregate, increased after adding nanosilica of about 3 percent and 110 m/s compared to the case that the samples did not have nanosilica in their composition. But the increase in concrete samples of magnetite aggregate was about 5.5 % and 245 m/s. In another comparison, nanosilica increased the ultrasonic pulse velocity of concrete samples containing 10% boron carbide even more than the ultrasonic pulse velocity of concrete samples, without boron carbide and nanosilica. This means that nanosilica was able to completely eliminate the effect of cavities and empty spaces, created in concrete by boron carbide. The case for this is in accordance with the reasons mentioned in the section of compressive strength.

### 3.3. Density

According to equations (1) and (2), the effect of concrete shielding density on mass attenuation coefficient and its linear attenuation coefficient, can be observed. It is expected that by applying heavy aggregates to the concrete and thus increasing the density of the concrete, the linear attenuation coefficient of the shielding concrete can be increased. In the meantime, if boron compounds need to be used in the shield construction, it is necessary to measure their effect on density and therefore on the linear attenuation coefficient of concrete.

Table 4 presents the density of samples. The density of samples containing iron oxide aggregates and boron carbide was compared with the ordinary aggregate sample, in order to better determine the extent and trend of changes, and the difference was expressed as percentage. As shown in Table 4, when concrete aggregates from hematite and magnetite were used, the density was higher than the ordinary aggregates concrete, and this increase for magnetite

Dodatek 10% węgliku boru zwiększył gęstość betonu z kruszywem hematytowym o 16%, a z kruszywem magnetytowym o 37,5%, w stosunku do gęstości próbki betonu ze zwykłym kruszywem i bez węgliku boru. Oznacza to, że zastąpienie 10% cementu węglikiem boru, w betonie zawierającym kruszywo żelazne, zmniejszyło jego gęstość o około 4%. Dotyczyło to zarówno kruszyw z hematytu, jak i magnetytu. W związku z tym, biorąc pod uwagę wyniki z tablicy 1, spadek ten można przypisać mniejszej gęstości węgliku boru, niż innych materiałów tworzących próbki betonu. Ariffin i in. (17) również odnotowali spadek gęstości w wyniku zastosowania węgliku boru i wzrostu jego procentowego udziału w betonie. W badaniu tym zastosowano jednak konwencjonalne kruszywa (17).

Wyniki tego rozdziału pokazują, że zastosowanie kruszywa żelaznego, zwłaszcza magnetytu, ma bardzo dobry wpływ na tłumienie promieniowania gamma, a jednocześnie zastosowanie z nim, w razie potrzeby węgliku boru, zmniejsza ten efekt. Redukcja ta nie jest znaczna, nawet przy dużych ilościach węgliku boru, a otrzymany beton wykazuje większe tłumienie promieniowania gamma, niż beton tradycyjny.

Po dodaniu nanokrzemionki do mieszanki betonowej, gęstość próbek betonowych zmniejszyła się. Przyczyną jest mniejsza gęstość nanokrzemionki w porównaniu z innymi składnikami betonu, wymienionymi w tablicy 1. Po dokładniejszym zbadaniu gęstości próbek betonu można stwierdzić, że po dodaniu nanokrzemionki do mieszanki betonowej, gęstość próbek spadła o 1%, a w niektórych przypadkach nawet o 1,5%, w porównaniu z betonem bez nanokrzemionki. Zmiany te są niewielkie, jednak biorąc pod uwagę, że zgodnie z równaniami (1) i (2) gęstość próbek ma wpływ na tłumienie promieniowania gamma, konieczne jest rozważenie efektu zmniejszenia gęstości próbek ze względu na dodatek nanokrzemionki, nawet jeśli efekt ten jest niewielki. Należy również zauważyć, że gęstość próbek betonu z nanokrzemionką, była nadal znacznie większa od gęstości betonu, zawierającego zwykle kruszywo.

### 3.4. Tłumienie promieniowania gamma

Rysunek 5 przedstawia zmierzone współczynniki tłumienia masowego próbek betonowych. Kruszywa ciężkie, w szczególności magnetyt, zmniejszają współczynnik tłumienia masowego w betonie. Ta tendencja spadkowa utrzymywała się wraz ze wzrostem zawartości węgliku boru. Na rys. 6 przedstawiono liniowe współczynniki tłumienia próbek, uzyskane w badaniach. Widoczna na wykresie zależność pokazuje wpływ kruszywa z żelazem na tłumienie promieniowania gamma, w porównaniu z próbką betonu z kruszywa zwykłego. Ponadto wyraźnie zaznacza się rola węgliku boru w obniżaniu liniowego współczynnika tłumienia próbek betonowych, zawierających kruszywo żelazne. Biorąc pod uwagę liczbę atomową żelaza-26, krzemu-14, stanowiących większą część zwykłych kruszyw w tym badaniu, liczba atomowa węgla-12 i boru-5 może być odpowiednim wskaźnikiem do uzasadnienia zachowania się próbek betonowych w tłumieniu promieniowania gamma.

Tablica 5 przedstawia liniowe współczynniki tłumienia próbek uzyskane w wyniku badań doświadczalnych i symulacji. W tablicy

Tablica 4 / Table 4

#### GĘSTOŚĆ BADANYCH BETONÓW

#### DENSITY OF INVESTIGATED CONCRETES

Designation Oznaczenie	Density Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	Density variation Zmiana gęstości, %
C	2395	0
H	2870	19.8
H2.5	2858	19.3
H5	2820	17.7
H10	2776	15.9
M	3406	42.2
M2.5	3372	40.8
M5	3348	39.8
M10	3294	37.5
HN	2826	18.0
HN2.5	2813	17.4
HN5	2800	16.9
HN10	2754	15.0
MN	3360	40.2
MN2.5	3337	39.3
MN5	3301	37.8
MN10	3262	36.2

aggregates was 42% and was higher than for hematite aggregates, where it was equal to 20%. In practice, the density of the aggregate shown in Table 1 can be a valid reason causing these results. By increasing the percentage of boron carbide in the samples, the density also decreased. In the presence of 10% boron carbide, the density of concrete containing hematite aggregates was by 16% and for concrete containing magnetite aggregates by 37.5% higher than the sample density of concrete with ordinary aggregates and without boron carbide. It means, that, replacing 10% of cement with boron carbide in concrete containing iron oxide aggregates, reduced its density by about 4%. It was true for both hematite and magnetite aggregate. In this regard, considering the results of Table 1, this decrease can be attributed to the lower density of boron carbide than the other materials forming concrete samples. Ariffin et al. (17) also reported a decrease in density due to the use of boron carbide and its increase in the percentage in concrete. However, in this study, conventional aggregates had been used (17).

The results of this section show that the application of iron oxide aggregate, especially magnetite ones, has a very good effect on gamma-ray attenuation and, the simultaneous use of boron carbide with it, if needed, reduces this effect. This reduction is not significant, even with large contents of boron carbide, and the resulting concrete is more capable of attenuating gamma rays than conventional concrete.

When nanosilica was added to the concrete mix, the density of the concrete samples decreased. The reason for this issue is the lower density of nanosilica, compared to other concrete components listed in Table 1. By more exact determination of at the density of concrete samples, it can be stated that by the addition of nanosilica

podano również różnice pomiędzy tymi dwiema wartościami  $\mu$ . Maksymalny błąd wyników doświadczalnych i symulacji wskazuje na dobrą dokładność wyników doświadczalnych napromieniowania. Dodatkowo obliczono i przedstawiono grubości warstwy połowicznego osłabienia promieniowania gamma, uzyskane z badania.

Porównanie wartości doświadczalnie wyznaczonego liniowego współczynnika tłumienia betonu, zawierającego kruszywa hematytowe i magnetytowe, a betonu wzorcowego pokazuje, że te pierwsze mają odpowiednio o 17% i 37% większy współczynnik tłumienia promieniowania gamma. Po dodaniu 2,5, 5 i 10 % węgliku boru do składu betonu zawierającego kruszywo żelazne, liniowe współczynniki tłumienia w próbce betonu z kruszywem hematytowym, zmniejszyły się odpowiednio o 2, 6 i 8 %. Natomiast spadek w próbkach zawierających kruszywo magnetytowe wynosił odpowiednio 2, 3 i 5 %.

Jak wynika z danych zawartych w tablicy 5, po dodaniu nanokrzemionki do próbek zawierających kruszywo ciężkie, zmierzony doświadczalnie liniowy współczynnik tłumienia próbek zawierających kruszywo hematytowe i magnetytowe, zmniejszył się odpowiednio o 2 i 1%. Tak więc liniowe współczynniki tłumienia tych próbek były o 15 i 36% większe niż liniowe współczynniki tłumienia próbki betonu, zawierającego zwykle kruszywo.

Po dodaniu nanokrzemionki do próbek zawierających węglik boru, liniowe współczynniki tłumienia próbek, które wcześniej były zmniejszone z powodu zawartości węgliku boru, zostały również dodatkowo zmniejszone przez dodatek nanokrzemionki, ale zmiana ta była niewielka. Można zauważyć, że po dodaniu nanokrzemionki do próbek zawierających 2,5%, 5% i 10% węgliku boru, liniowy współczynnik tłumienia zmniejszył się odpowiednio o około 1%, 2% i 4%. Zmniejszenie to było takie samo w przypadku próbek zawierających kruszywa hematytowe i magnetytowe. Tak więc zmierzone liniowe współczynniki tłumienia promieniowania gamma, w próbkach zawierających kruszywa hematytowe i magnetytowe z nanokrzemionką i maksymalnie 10% dodatkiem węgliku boru, były odpowiednio o 11 i 31% większe niż liniowe

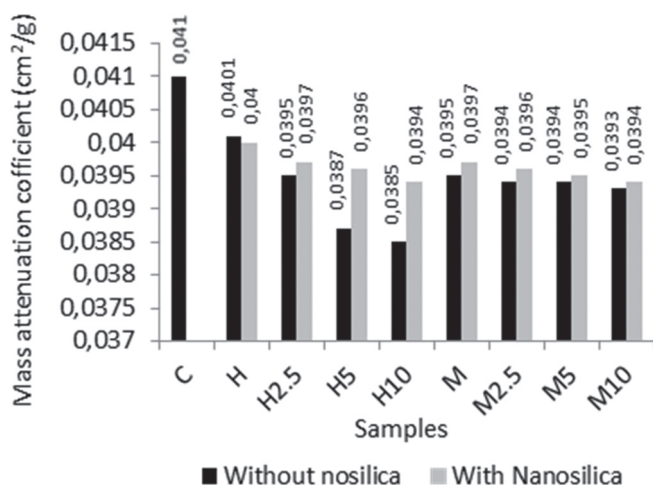
to the concrete mix, the density of the samples decreased 1% and in some cases up to 2%, compared to the case that there was not nanosilica in concrete mix. This reduction was very low.

However, given that according to equations (1) and (2), the density of the samples has an effect on gamma radiation attenuation, it is necessary to consider the effect of reducing the density of the samples due to the presence of nanosilica, even if this effect is low. It should also be mentioned that the density of concrete samples was still significantly higher than the density of concrete samples containing ordinary aggregates.

### 3.4. Gamma ray attenuation

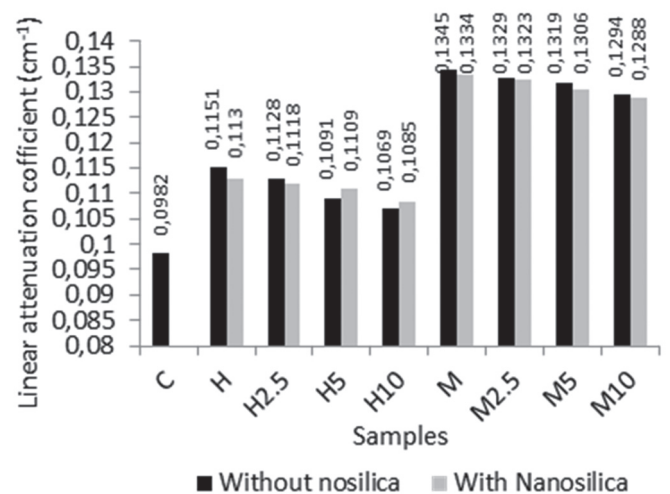
Figure 5 represents the coefficients of mass attenuation of concrete samples determined experimentally. Iron oxide aggregate, in particular magnetite, decrease the mass attenuation coefficient of the concrete. This decreasing trend continued with the increase in the boron carbide content. Fig. 6 shows the linear attenuation coefficients of the samples obtained from the tests. The incremental trend in the figure fully presents the effect of iron oxide aggregate in a concrete sample on gamma ray attenuation, compared to a conventional concrete sample. In addition, the role of boron carbide is clearly evident in reducing the linear attenuation coefficient of concrete samples containing iron oxide aggregate. Considering the atomic number of iron-26, silicon-14, accounting for the major part of the ordinary aggregates in this study, carbon-12 and boron-5 can be an appropriate index to justify the behaviour of concrete samples, in the gamma rays attenuation.

Table 5 represents the linear attenuation coefficients of the samples obtained by experimentation and simulation. In this table, the difference between the two values of  $\mu$  was also calculated. A maximum error between the results of the experiment and the simulation showed the accuracy of the results of the irradiation experiments. In addition, the HVL values obtained from the test were also calculated and presented.



Rys. 5. Masowe współczynniki tłumienia badanych betonów

Fig. 5. The mass attenuation coefficients of investigated concretes



Rys. 6. Wyznaczone doświadczalnie liniowe współczynniki tłumienia próbek

Fig. 6. Experimental linear attenuation coefficients of the samples

współczynniki tłumienia promieniowania gamma, próbek betonu zawierającego zwykle kruszywo.

Oznacza to, że dodatek 10% węgla boru w połączeniu z nanokrzemionką, w próbkach betonowych zawierających kruszywo hematytowe i magnetytowe, zmniejszył odpowiednio o 38 i 16% zdolność do tłumienia promieniowania gamma przez te próbki. Podane wartości są potwierdzone przez porównanie danych z tabelicy 5 z wynikami uzyskanymi z symulacji. Bardzo mały błąd wyników badań z symulacją komputerową, świadczy o poprawności uzyskanych wyników.

W przypadku konieczności jednoczesnego osłabienia neutronów termicznych i promieni gamma, w pojedynczej warstwie osłony z betonu ciężkiego z dodatkiem węgla boru, a także nanokrzemionki dodawanej w celu skompensowania strat wytrzymałości spowodowanych przez węgiel boru, projektant osłony powinien rozważyć wpływ tych dwóch materiałów na zdolność osłabiania promieni gamma przez beton. Problem ten oraz dbałość o zapewnienie odpowiednich właściwości mechanicznych betonu z kruszyw magnetytowych, uwzględniono we wszystkich doświadczeniach. Analizując uzyskane wyniki stwierdzić można, że stosowanie kruszyw magnetytowych, zamiast zwykłych kruszyw, jest bardzo przydatne w budowie osłon przeciw promieniowaniu gamma. W sytuacji wyboru pomiędzy kruszywami hematytowymi i magnetytowymi, te drugie wydają się bardziej odpowiednie.

#### 4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano następujące wyniki:

1. Zastosowanie kruszywa hematytowego zwiększyło gęstość betonu o 20%, wytrzymałość na ścislenie o 6%, szybkość przejścia fali ultradźwiękowej o 0,8 %, liniowy współczynnik tłumienia się o 17 %.
2. Zastosowanie kruszywa magnetytowego zwiększyło gęstość betonu o 42 %, wytrzymałość na ścislenie o 53 %, szybkość przejścia fali ultradźwiękowej o 9 %, a liniowy współczynnik tłumienia o 37 %.
3. Zawartość maksymalnie 10 procent węgla boru wraz z kruszywem żelaznym w betonie, spowodowało zmniejszenie gęstości o 4%, wytrzymałości na ścislenie od 13 do 20%, prędkości impulsu ultradźwiękowego od 3 do 3,5%, a liniowego współczynnika tłumienia od 5 do 8%. Pomimo tych zmian, wszystkie wymienione właściwości, były jednak znacznie lepsze niż w przypadku betonu tradycyjnego.
4. Po dodaniu nanokrzemionki do mieszanki betonowej wytrzymałość na ścislenie betonu wzrosła od 5,5 do 22%, a prędkość impulsu

Tablica 5 / Table 5

WSPÓŁCZYNNIKI OSŁABIENIA PROMIENIOWANIA GAMMA WYZNACZONE DOŚWIADCZALNIE I OBLICZONE METODĄ SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

GAMMA RADIATION ATTENUATION COEFFICIENTS DETERMINED EXPERIMENTALLY AND CALCULATED BY MEANS OF COMPUTER SIMULATIONS

Designation Oznaczenie	$\mu_m$ , $cm^2/g$	$\mu$ , $cm^{-1}$			HVL warstwa połowicznego osłabienia, $cm$
		Experiment Doświadczalny	Simulation Obliczony	Error Błąd, %	
C	0.041	0.0982	0.0996	1.43	7.72
H	0.0401	0.1151	0.1129	1.94	5.95
H 2.5	0.0395	0.1128	0.1125	0.37	6.15
H 5	0.0387	0.1091	0.1108	1.53	6.39
H 10	0.0385	0.1069	0.1092	2.10	6.53
M	0.0395	0.1345	0.1345	0	5.15
M 2.5	0.0394	0.1329	0.1329	0	5.22
M 5	0.0394	0.1319	0.1321	0.15	5.26
M 10	0.0393	0.1294	0.1297	0.23	5.36
HN	0.0400	0.1130	0.1112	1.60	6.13
HN 2.5	0.0397	0.1118	0.1104	1.30	6.20
HN 5	0.0396	0.1109	0.1100	0.80	6.25
HN 10	0.0394	0.1085	0.1080	0.50	6.39
MN	0.0397	0.1334	0.1325	0.70	5.20
MN 2.5	0.0396	0.1323	0.1317	0.45	5.24
MN 5	0.0395	0.1306	0.1301	0.40	5.31
MN 10	0.0395	0.1288	0.1285	0.20	5.38

A comparison of the linear attenuation coefficient of the experiment between the concrete containing hematite and magnetite aggregates and conventional concrete shows that they achieved a 17% and 37% increase in gamma ray attenuation, respectively. Looking more closely at the table numbers, it is perceived that by adding 2.5, 5 and 10 boron carbide percent to the concrete composition containing iron oxide aggregates, the linear attenuation coefficients in the concrete incorporating hematite aggregates declined by 2, 6 and 8 %, respectively. But the reduction in samples containing magnetite aggregate was 2, 3 and 5 %, respectively.

According to data in Table 5, when nanosilica was added to the samples containing iron oxide aggregate, the linear attenuation coefficient of the samples containing hematite and magnetite aggregates, measured experimentally, decreased by 2 and 1%, respectively. So the linear attenuation coefficients of these samples was 15 and 36% higher than the linear attenuation coefficient of the concrete sample contained ordinary aggregates.

It shows, that the addition of nanosilica to samples containing boron carbide, and the linear attenuation coefficients of the samples, which had previously been reduced due to the presence of boron carbide, were also reduced by the presence of nanosilica but this reduction was very low. It can be seen that by the addition of nanosilica to the samples containing 2.5, 5 and 10% of boron carbide, the linear attenuation coefficient decreased by approxi-

su ultradźwiękowego od 3 do 5,5%, natomiast gęstość zmniejszyła się o 1,5%, a liniowy współczynnik tłumienia od 5 do 6,5%.

5. Koncepcja zastosowania węgla boru i kruszywa ciężkiego z tlenków żelaza do jednoczesnego osłabiania neutronów termicznych i promieni gamma, w pojedynczej warstwie betonu ochronnego, a następnie zastosowanie nanokrzemionki w celu poprawy właściwości mechanicznych betonu, w praktyce jest możliwa. Konieczne jest tylko, uwzględnienie przez projektanta osłony zmniejszenie osłabiania promieni gamma przez beton, powodowanego dodatkami węgla boru i nanokrzemionki.

6. W przypadku wyboru kruszyw ciężkich do betonu dla ochrony przed promieniowaniem, hematytu lub magnetytu, wyniki przeprowadzonych badań zdecydowanie wskazują na magnetyt.

7. Wyniki badań promieniowania gamma oraz ich symulacji metodą Monte Carlo, pokrywały się z wynikami uzyskanymi za pomocą programu MCNP4C. Maksymalna różnica między nimi wynosiła 2 %.

## Podziękowania

Autorzy pragną uznać i docenić wysiłki dr Babaka Shirani, szanowanego członka wydziału na Uniwersytecie Isfahan, a także panów Behnam Jandaghian i Golabi, dyrektora wykonawczego kopalni KoohSerahan.

## Literatura / References

1. P. Sikora, M.A. Elrahman, E. Horszczaruk, P. Brzozowski, D. Stephan, Incorporation of magnetite powder as a cement additive for improving thermal resistance and gamma-ray shielding properties of cement-based composites. *Constr. Build. Mater.* 204, 113-121 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.161>
2. A. El-Sawy, Development of Nuclear Power Reactor Shielding Using Two Different Types of Heavy Concrete. *Arab. J.Nucl. Sci. App.* 50(3), 151-158 (2017).
3. B. Oto, A. Gür, E.Kavaz, T. Çakır, N. Yaltay, Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes. *Prog. Nucl. Energy* 92, 71-80(2016). <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.06.011>
4. B. Oto, A. Gür, Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate. *Int. J. Physic. Sci.* 8(8), 310-314(2013). <https://doi.org/10.5897/IJPS2013.3854>
5. O. Gencel, A. Bozkurt, E. Kam, T. Korkut, Determination and calculation of gamma and neutron shielding characteristics of concretes containing different hematite proportions. *Ann.Nucl. Energy* 38, 2719-2723(2011). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.08.010>
6. O. Gencel, W. Brostow, C. Ozel, M. Filiz, Concretes containing hematite for use as shielding barriers. *Mater. Sci.* 16(3), 249-256(2010).
7. K. Saidani, L. Ajam, M.B. Ouezdou, Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* 95, 287-295(2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.140>
8. S. Shirmardi, M. Shamsaei, M. Naserpour, Comparison of photon attenuation coefficients of various barite concretes and lead by MCNP code, XCOM and experimental data. *Ann.Nucl. Energy* 55, 288-291(2013). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.01.002>
9. I. Akkurt, H. Akyıldırım, B. Mavi, S. Kilincarslan, C. Basyigit, X Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate.

mately by 1, 2 and 4%, respectively. This reduction was the same for the samples containing hematite and magnetite aggregates. Thus, the gamma-ray linear attenuation coefficients measured experimentally in samples containing hematite and magnetite aggregates with nanosilica and a maximum of 10% boron carbide was 11 and 31% higher than the gamma-ray linear attenuation coefficient, of samples contained ordinary aggregates.

This means that the addition of 10% boron carbide in combination with nanosilica in concrete samples containing hematite and magnetite aggregates, reduced the ability of concrete to attenuate gamma-rays by 38 and 16% respectively. The values mentioned were confirmed by the data presented in Table 5 and compared to the values obtained from the simulations. In addition, the very small difference between the test results and computer simulation, proves the correctness of the obtained results.

If it is necessary to simultaneously weaken the thermal neutrons and gamma rays, using the single layer of heavy concrete with boron carbide, and also to eliminate the strength decrease of concrete due to the addition of boron carbide using nanosilica. The protection designer should consider the reducing effect of these materials, on the ability to weaken gamma rays by concrete. This issue and attention to the mechanical performance of magnetite aggregates have been performed in all experiments. Even the errors guide us to the point that using magnetite aggregate, instead of ordinary aggregates, is very useful in the construction of gamma rays shielding. Especially when the selection between hematite and magnetite aggregates is needed; the second seems to be more suitable.

## 4. Conclusions

The following results were obtained from the current study:

1. When hematite aggregate replaced the ordinary aggregates in concrete, the density increased by 20 %, the compressive strength increased by 6 %, the ultrasonic pulse rate increased by 1 %, linear attenuation coefficient increased by 17 %.
2. When magnetite aggregates replaced the ordinary aggregates in concrete, the density increased by 42 %, the compressive strength by 53 %, the ultrasonic pulse rate by 9 %, linear attenuation coefficient by 37 %.
3. The content of the maximum of 10 percent of boron carbide, along with iron oxide aggregate in concrete declined the density by 4%, the compressive strength by between 13 to 20%, the ultrasonic pulse velocity by between 2.5 to 3%, and linear attenuation coefficient by between 5 to 8%. Notwithstanding this reduction, however, all of the mentioned parameters were significantly higher than those of the conventional concrete.
4. By the addition of nanosilica to the concrete mix, the compressive strength increased between 5.5 to 22% and ultrasonic pulse velocity between 3 to 5.5%, but density was reduced by 2% and linear attenuation coefficient between 1 to 2%.

Ann.Nucl. Energy**37**(7), 910-914 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.04.001>

10. I. Akkurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan, C. Basyigit, Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies. Prog.Nucl. Energy **52**, 620-623(2010). <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2010.04.006>

11. V.A. Kumar, P.A. Kumar, V. Aravindh, L. J. Johnson, Gamma Radiation Absorption Characteristics of Concrete with Boron Carbide and Zeolite. Int. J. Modern Trends Sci. Tech.**3**(4), 89-92(2017).

12. I. Akkurt, H. Akyıldırım, B. Mavi, S. Kilincarslan, C. Basyigit, Radiation shielding of concrete containing zeolite. Radiat.Measur.**45**(7), 827-830(2010). <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.04.012>

13. B. Oto, N. Yıldız, T. Korkut, E. Kavaz, Neutron shielding qualities and gamma ray buildup factors of concretes containing limonite ore. Nucl. Eng. Design.**293**, 166-175(2015). <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.07.060>

14. M. Glinicki, A. Antolik, M. Gawlicki, Evaluation of compatibility of neutron-shielding boron aggregates with Portland cement in mortar. Constr. Build. Mater. **164**, 731-738(2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.228>

15. D. Sariyer, R. Küçer, N. Küçer, Neutron shielding properties of concretes containing boron carbide and ferro-boron. Procedia-Social Behavioral Sci.**195**, 1752-1756(2015). <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.320>

16. Y. Abdullah, M. R. Yusof, A. Muhamad, Z. Samsu, N. Abdullah, Cement-boron carbide concrete as radiation shielding material. J.Nucl. Related Tech.**7**(2), 74-79(2010).

17. F.N. Ariffin, Y. Abdullah, R. Shamsudin, R. Hamid, SH. Ahmad, Effect of Boron Carbide addition on the physical, mechanical and microstructural properties of Portland cement concrete. J. Appl. Sci.**11**(22), 3738-3743(2011). <https://doi.org/10.3923/jas.2011.3738.3743>

18. F. Lo Monte, P. G. Gambarova, Thermo-Mechanical Behavior of Baritic Concrete Exposed to High Temperature. Cem.Concr. Comp.**53**, 305-315(2014). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.009>

19. M. Kharita, S. Yousef, M. AlNassar, Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. Prog.Nucl. Energy**53**, 207-211(2011). <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2010.09.012>

20. M.G. El-Samrah, M. A. Abdel-Rahman, A.M. Kany, Study characteristics of new concrete mixes and their mechanical, physical, and gamma radiation attenuation features, Zeitschr. Organ. Allgem. Chem.**644**, 92-99(2018). <https://doi.org/10.1002/zaac.201700420>

21. M. Kaçal, F. Akman, M. Sayyed, Evaluation of gamma-ray and neutron attenuation properties of some polymers. Nucl. Eng. Tech.**51**, 818-824(2019). <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.11.011>

22. D. Rezaei-Ochbelagh, S. Azimkhani, H.G. Mosavinejad, Shielding and strength tests of silica fume concrete. Ann.Nucl. Energy.**45**, 150-154 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.02.006>

23. M. Rafieizonooz, J. Mirza, M.R. Salim, M.W. Hussin, E. Khankhaje, Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. Constr. Build. Mater.**116**, 15-24(2016).

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.080>

24. I.M. Nikbin, S. Rahimi, H. Allahyari, M. Damadi, A comprehensive analytical study on the mechanical properties of concrete containing waste bottom ash as natural aggregate replacement, Constr. Build. Mater.**121**, 746-759(2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.078>

25. M. Alwaeli, Investigation of gamma radiation shielding and compressive strength properties of concrete containing scale and granulated

- The idea of using boron carbide and iron oxide aggregates to simultaneously weaken thermal neutrons and gamma rays in a single layer of protective concrete, and followed by the use of nanosilica to improve the mechanical properties of concrete in practice is possible. It is only necessary that the protection designer must consider the reduction of weakening gamma rays by concrete, due to the boron carbide and nanosilica.
- If the choice of iron oxide aggregates between hematite and magnetite for radiation protection is considered, the obtained results of this research, strongly suggest magnetite.
- The results of gamma irradiation tests and their simulation results with the Monte Carlo method were in good accordance with that of the MCNP4C software. Such that the maximum error between them for gamma-rays was 2 %.

## Acknowledgments

The authors would like to acknowledge and appreciate the efforts of Dr. Babak Shirani, the respected member of the faculty at Isfahan University, Mr. Behnam Jandaghian and Mr. Golabi, executive director of the Kooh Serahan mine.

- lead-zinc slag wastes. *J. Clean. Prod.* **166**, 157-162(2017).<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.203>
- 26.M. Alwaeli, The implementation of scale and steel chips waste as a replacement for raw sand in concrete manufacturing. *J. Clean. Prod.* **137**, 1038-1044(2016).<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.211>
- 27.S. Ghannam, H. Najm, R. Vasconez, Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sust. Mater. Techn.* **9**, 1-9(2016).<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.001>
- 28.E. Zorla, C. Ipbüker, A. Biland, M. Kiisk, S. Kovaljov, A.H. Tkaczyk, V. Gulik, Radiation shielding properties of high performance concrete reinforced with basalt fibers infused with natural and enriched boron. *Nucl. Eng. Design* **313**, 306-318(2017). <https://doi.org/10.1016/j.nuceng-des.2016.12.029>
- 29.M. Çullu, H. Ertaş, Determination of the effect of lead mine waste aggregate on some concrete properties and radiation shielding. *Constr. Build. Mater.* **125**, 625-631 (2016).<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.069>
- 30.M.A. González-Ortega, I. Segura, S. Cavalaro, B. Toralles-Carbonari, A. Aguado, A. Andrello, Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags, *Constr. Build. Mater.* **51**, 432-438(2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.067>
- 31.A.U. Shettima, MW. Hussin, Y. Ahmad, J. Mirza, Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Constr. Build. Mater.* **120**, 72-79(2016).<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>
32. Y. Yao, X. Zhang, M. Li, R. Yang, T. Jiang, Investigation of gamma ray shielding efficiency and mechanical performances of concrete shields containing bismuth oxide as an environmentally friendly additive. *Radiat. Phys. Chem.* **127**, 188-193(2016). <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.06.028>
33. K. Behfarnia, M. Rostami, Effects of micro and nanoparticles of SiO<sub>2</sub> on the permeability of alkali activated slag concrete. *Constr. Build. Mater.* **131**, 205-213(2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.070>
34. A. Nazari, S. Riahi, Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Mater. Sci. Eng.* **527**, 7663-7672 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.095>
35. J.I. Tobón, J. Payá, O.J. Restrepo, Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles. *Constr. Build. Mater.* **80**, 92-97(2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.074>
36. S.A. Aleem, M. Heikal, W. Morsi, Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica. *Constr. Build. Mater.* **59**, 151-160(2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.039>
37. M. Heikal, S. Abd-El-Aleem, W. Morsi, Characteristics of blended cements containing nano-silica, *HBRC J*, **9**, 243-255(2013). <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.09.001>
38. A.M. Said, M.S. Zeidan, M. Bassuoni, Y. Tian, Properties of concrete incorporating nano-silica. *Constr. Build. Mater.* **36**, 838-844(2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044>
39. S. Al-Bahar, J. Chakkamalayath, A. Joseph, S. Al-Otaibi, M.J. Abdul-salam, Nano mechanical and Surface Morphological Properties of Hydrated Cement Paste Containing Volcanic Ash and Micro-or Nano-Silica. *KSCE J. Civil. Eng.* **22**, 1354-1360(2018). <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1737-9>