

## Równoczesne tłumienie promieniowania gamma i neutronów w jednowarstwowej osłonie betonowej

## Simultaneous attenuation of gamma ray and neutrons in single layer concrete shield

Majid Safamehr<sup>1</sup>, Mohsen Izadnia<sup>1\*</sup>, Seyed Hamid Hashemi<sup>2</sup>, Seyed Jalil Hoseini<sup>1</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

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

### Streszczenie

Dzięki możliwości zastosowania różnych połączeń, beton jest jednym z najbardziej odpowiednich materiałów do konstruowania osłon przed promieniowaniem. W niniejszych badaniach kruszywo hematytowe i magnetytowe zastąpiło kruszywo zwykłe, oddzielnie i całkowicie w dwóch etapach. Dodatkowo zastępowano 2,5, 5 i 10% masowych cementu węglikiem boru. Przeprowadzono badanie gęstości, tłumienia promieniowania gamma z użyciem źródła Co 60 i promieniowania neutronowego z użyciem Am-Be 241. Zgodnie z wynikami, zastąpienie kruszywa zwykłego kruszywem hematytowym, poprawiło liniowy współczynnik tłumienia i makroskopowy przekrój czynny absorpcji neutronów betonu odpowiednio o 17% i 73%. Właściwości te poprawiły się odpowiednio o 37% i 105%, przy zastosowaniu kruszywa magnetytowego. Ponadto, przy dodaniu do składu betonu maksymalnie 10% węglika boru, makroskopowy przekrój czynny wzrósł o 120%, jednak liniowy współczynnik tłumienia zmniejszył się tylko o 5-8%. Oznacza to, że możliwe jest uzyskanie odpowiedniego tłumienia promieniowania gamma i wiązek neutronów jednocześnie, w jednej warstwie betonowej osłony. Ponadto stwierdzono dobrą zgodność wyników badań i symulacji Monte Carlo.

**Słowa kluczowe:** węgiel boru, beton, promienie gamma, hematyt, magnetyt, neutrony

### Summary

The ability to create various compounds has made concrete one of the most suitable materials for constructing radiation shields. In this investigation, hematite and magnetite aggregates were used to replace ordinary aggregate, separately and completely in two stages. Boron carbide was also substituting cement at percentages of 2.5, 5, and 10 by mass. The density test, gamma irradiation with Co 60 and neutron irradiation with Am-Be 241 were performed. According to the results, the replacement of ordinary aggregates with hematite aggregates in concrete, improved the linear attenuation coefficient and macroscopic cross section by 17% and 73%, respectively. These parameters increased by 37% and 105%, respectively, by the use of magnetite aggregates. Moreover, with the addition of a maximum of 10% boron carbide to the concrete, the macroscopic cross-section increased by 120%, however, the linear attenuation coefficient decreased by between 5% and 8%. This means that it is possible to have a suitable attenuation of gamma ray and neutron beams in a single layer of concrete shield simultaneously. In addition, the results of the tests and Monte Carlo simulation were found to have good consistency.

**Keywords:** boron carbide, concrete, gamma rays, hematite, magnetite, neutron

### 1. Wprowadzenie

Obecnie, ze względu na rosnące zastosowanie promieniowania, tworzenie osłon w celu uniknięcia szkód dla ludzi i środowiska, jest niezaprzeczalne. Szczególne znaczenie pod tym względem ma ochrona przed promieniami gamma i wiązkami neutronów. Promienie gamma są tłumione za pomocą pierwiastków o dużej

### 1. Introduction

Now, owing to the growing application of radiation, the need to create shields to protect people and the environment, is undeniable. Of particular significance in this regard is protection against gamma rays and neutron beams. Gamma rays are attenuated using elements such as lead and iron with high atomic numbers.

liczbie atomowej, do których należą ołów i żelazo. Jednak neutrony mają szeroki zakres energii i mocy przenikania, dlatego aby je tłumić, muszą przede wszystkim zostać spowolnione, przez następujące pierwiastki: wodór, żelazo i węgiel, stosując rozpraszanie elastyczne i nieelastyczne. Następnie konieczne jest wychwytywanie powolnych i termicznych neutronów za pomocą boru i kadmu, o dobrym przekroju czynnym na wychwyt neutronów. Pod tym względem bor ma szczególne znaczenie ze względu na dużą zdolność do wychwytywania neutronów termicznych i zmniejszania energii penetracji wtórnych promieni gamma, spowodowanych zderzeniami neutronów z materiałem (1-4).

Beton jest jednym z najlepszych materiałów do budowy osłon, ze względu na jego przystępną cenę, dostępność, łatwość użycia, plastyczność i możliwość zastosowania w różnych połączeniach. W szczególności, ze względu na obecność wodoru oraz lekkich i ciężkich pierwiastków, może być skuteczny w tłumieniu i absorpcji promieniowania (4).

Biorąc pod uwagę, że kruszywo stanowi większą część objętości betonu, odgrywa ono również ważną rolę w odniesieniu do właściwości mechanicznych i ochronnych betonu. W celu zwiększenia efektywnego tłumienia promieniowania przeprowadzono wiele prac, zgodnie z zasadami i przepisami dotyczącymi stosowania różnych kruszyw, w przypadku betonu osłonowego. Oprócz kruszyw naturalnych i syntetycznych, w celu zwiększenia efektywnego tłumienia promieniowania stosując ekonomiczną metodę oraz metody doświadczalne i symulacyjne. W próbach tych można wymienić zastosowanie magnetytu (5-8), hematytu (4, 9,10), barytu (11-14), zeolitu (15-16) i limonitu (17).

Jak już wspomniano, zastosowanie związków boru w betonie osłonowym jest bardzo skuteczne, szczególnie przeciwko wiązkom neutronów. Przeprowadzono badania zastosowania tych związków w betonie, oceniając ich rolę w ochronie przed neutronami pozytywnie, jednak niekiedy występowało opóźnione wiązanie betonu i spadek wytrzymałości na ściskanie (4, 18-22).

W badaniach tych, w celu poprawy tłumienia promieni gamma i neutronów prędkich, dwa rodzaje kruszyw żelaznych zastąpiły dwukrotnie całkowicie, oddzielnie i razem, zwykłe kruszywa w betonie. Natomiast, węgiel boru zastąpił cement w różnych proporcjach, w celu zbadania zdolności betonu, do tłumienia neutronów termicznych. Ogólnie rzecz biorąc, celem tego badania było określenie zdolności jednoczesnego tłumienia promieniowania gamma i neutronów termicznych, w betonie zawierającym kruszywo żelazne i węgiel boru.

Dla ochrony przed promieniowaniem, zwłaszcza łącznie promieniami gamma i neutronami, często stosuje się osłony wielowarstwowe. W związku z tym każda warstwa ochronna ma określoną funkcję tłumienia. Można zatem stwierdzić, że głównym celem niniejszej pracy jest zbadanie możliwości wykonania betonowej osłony, która może jednocześnie tłumić promieniowanie gamma i neutrony termiczne, w jednej warstwie. Ponadto, porównanie dwóch rodzajów kruszyw w tym hematytu i magnetytu, okazało się zgodne z założonym celem.

But neutrons include a wide range of energy and penetration powers, therefore, for attenuating, they must first be slowed down by elements such as hydrogen, iron, and carbon, through elastic and inelastic scattering. Then, it is necessary to capture slow and thermal neutrons with elements such as boron and cadmium, with good capture cross section. In this regard, boron is of particular importance due to its high ability to capture thermal neutrons and to reduce the penetration power of secondary gamma rays, caused by neutron-to-material collisions (1-4).

Concrete is one of the best materials for the construction of shields, due to its affordability, availability, ease of use, ductility, and the potential to be used in various compounds. In particular, because of the presence of hydrogen and light and heavy elements, it can be effective in attenuation and absorption of radiation (4).

Considering that aggregates include the major part of the concrete volume, they also play a major role regarding the mechanical and protective properties of concrete. Many efforts have been made according to the rules and regulations with respect to the use of various aggregates in the case of shielding concrete, including natural and synthetic aggregates, in order to enhance an effective attenuation of radiation by economic, native and applied approaches, and in experimental, software, and simulations methods. Among these attempts, the use of magnetite (5-8), hematite (4, 9-10), barite (11-14), zeolite (15-16), and limonite (17) can be mentioned.

As mentioned, the use of boron compounds in the shield concrete is very effective, especially against neutron beams. Studies have been conducted on the use of these compounds in concrete, assessing the role of these materials in neutron protection positively, however, sometimes latency in the setting time and the decrease in the compressive strength have been reported (4, 18-22).

In this research, to improve the attenuation of gamma rays and fast neutrons, two types of iron aggregates replaced ordinary aggregates in concrete, separately and completely twice. On the other hand, boron carbide replaced the cement at different percentages to test the capability of concrete to attenuate thermal neutrons. In general, the objective of this study was to identify the ability of simultaneous attenuation of gamma rays and thermal neutrons, in concrete containing iron aggregates and boron carbide.

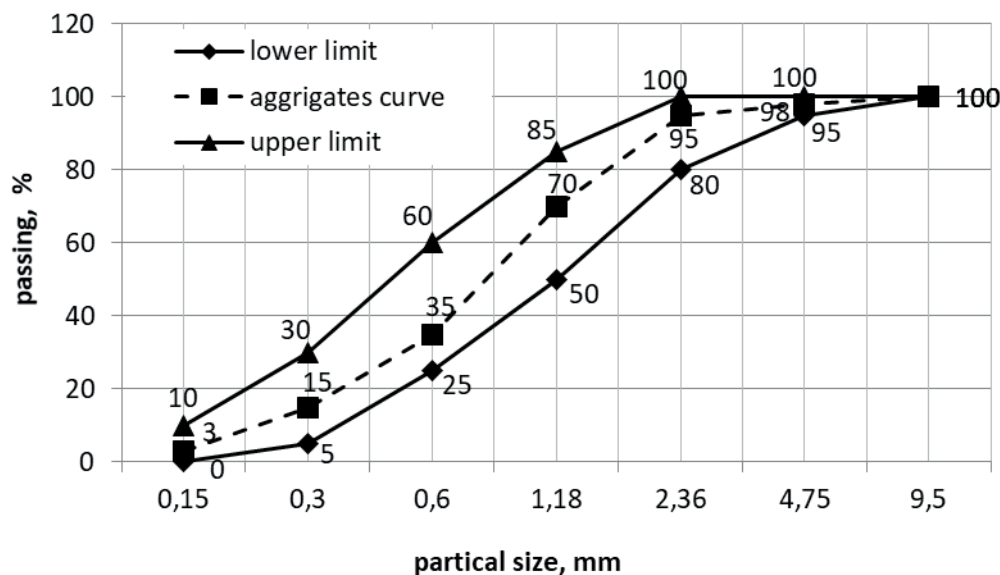
For radiation protection, especially when combined with gamma rays and neutrons, it is often common to apply multilayer shields. As such, each layer of protection has a particular attenuation function. Accordingly, it may be claimed that investigating the feasibility of making a concrete shield that can simultaneously attenuate gamma rays and thermal neutrons in one layer, is the main objective of this study. Moreover, the comparison between hematite and magnetite aggregates is in line with the declared purpose.

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Materiały

Kruszywa hematytowe w gatunku 47% i kruszywa magnetytowe w gatunku 60%, oba pokruszone do wielkości ziarna poniżej 9,5 mm, zostały przygotowane w kopalni Kooch Serahan, położonej 15 km na południe od miasta Kashan. Natomiast zwykłe kruszywa o tej samej wielkości, zostały pokruszone i przygotowane w kopalni Kohan Khak, położonej 50 km na południowy zachód od miasta Ardestan, w prowincji Isfahan. W celu wyznaczenia krzywych uziarnienia kruszywa przedstawionych na rys. 1 oraz określenia ich właściwości fizycznych podanych w tabelicy 1, przestrzegano następujących norm: ASTM C33, ASTM C127, ASTM C128, ASTM C637 oraz punktu 3.3. w normie ACI 349-06. Skład chemiczny kruszywa podano również w tabeli 2.

Cement klasy I o wytrzymałości 325 kg/cm<sup>2</sup>, został przygotowany w Isfahan Cement Factory, położonej na zachód od miasta Isfahan, zgodnie z normowymi zasadami ASTM C150 i punktem



Rys. 1. Krzywa uziarnienia kruszywa

Fig. 1. Aggregates grading curve

Tablica 1 / Table 1

#### WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE MATERIAŁÓW

#### PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Component / Składnik	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 / Węglik boru	2.52	–
Cement	3.15	–

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials

Hematite aggregates with a grade of 47% and magnetite aggregates with a grade of 60%, both crushed to obtain grain size up to 9.5 mm, were prepared from the Kooch Serahan mine, located 15 km south of Kashan city, and ordinary aggregates of the same size were crushed and prepared from the Kohan Khak mine located 50 km southwest of Ardestan city, Isfahan province. To determine the aggregate grading curves shown in Fig. 1 and determine their physical properties as given in Table 1, the standards of ASTM C33, ASTM C127, ASTM C128, ASTM C637, and Section 3.3 of ACI 349-06 were observed. The chemical composition of the aggregates is also given in Table 2. Type I cement with an ultimate strength of 325 kg/cm<sup>2</sup> was prepared 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 Pishro Ceramic Mehr. Its particle size was smaller than 7 μm and with the specifications given in Table 2. Water consumption was also considered according to the ASTM D1129 standard and Clause 3.4 of ACI 349-06 standard. Tap water from Isfahan city water system, which is not particularly problematic for drinking, was used.

#### 2.1.1. Mix design

The mix designs presented in Table 3 were obtained according to the volumetric methods and according to the recommendations of ACI 211. After trial and error, the water to cement ratio was obtained as 0.5 and cement dose was equal to 414 kg/m<sup>3</sup>. The numbers listed in the table are expressed in kilograms per cubic meter of concrete. In four mix designs, the aggregates were completely hematite, and in four different mix designs, aggregates were completely magnetite, and boron carbide was considered at percentages 2.5, 5 and 10. A combination containing ordinary aggregate without any additive was considered as a control for further comparison. The abbreviations of each compound are expressed in Table 3. It should be noted that the water absorption of aggregates and additives, was considered in the manufacture of the samples.

#### 2.1.2. Preparation of samples

Preparation and curing of samples were carried out in accordance with the principles of the ASTM C192 standard, ACI 349-06, and the performance of some researchers(1,10).

Tablica 2 / Table 2

## SKŁAD CHEMICZNY MATERIAŁÓW

## CHEMICAL COMPOSITION OF THE MATERIALS

Compound Składnik	Ordinary aggregate Kruszywo zwykłe	Hematite aggregate Kruszywo hematytowe	Magnetite aggregate Kruszywo magnetytowe	Boron carbide Węglik boru	Cement
	Content / Zawartość, %				
SiO <sub>2</sub>	49.29	18.68	7.51	1.15	17.52
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	46.82	59.68	4.86	4.21
CaO	18.71	9.42	11.08	0.63	66.96
Na <sub>2</sub> O	1.39	0.34	0.18	0.043	0.23
MgO	2.54	7.12	12.19	---	2.06
K <sub>2</sub> O	1.21	0.32	0.05	---	1.01
TiO <sub>2</sub>	0.69	0.46	0.09	0.057	0.23
MnO	0.06	0.62	0.32	0.047	0.44
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.06	0.03	0.016	0.18
LOI	13.05	11.90	7.65	---	1.1

3.2.1 w normie ACI 349-06. Skład chemiczny cementu podano w tablicy 2.

Węglik boru otrzymano z Iranian Scientific Company of Pishro Ceramic Mehr, o wielkości ziarna mniejszej od 7 µm i o składzie podanym w tablicy 2. Uwzględniono również zużycie wody z wodociągów miasta Isfahan „zdatna do picia”. Była zgodna z normą ASTM D1129 i punktem 3.4 normy ACI 349-06.

## 2.1.1. Projekt mieszanki

Przedstawione w tablicy 3 składy mieszanek uzyskano stosując metody objętościowe, zgodnie z zaleceniami ACI 211. Metodą prób i błędów uzyskano stosunek wody do cementu wynoszący 0,5, a zawartość cementu wynosiła 414 kg/m<sup>3</sup>. Liczby podane w tablicy wyrażone są w kg/m<sup>3</sup> betonu. W czterech projektach mieszanek kruszywo było tylko hematytowe, a w czterech różnych projektach mieszanek kruszywo było wyłącznie magnetytowe, a węglik boru był dodany w procentach: 2,5, 5 i 10. Kombinacja zawierająca zwykłe kruszywo, bez żadnych dodatków, została potraktowana

A mixer with a capacity of 356 dm<sup>3</sup> was used to prepare the samples. First, the aggregates in dry state were mixed, followed by mixing of the dry cement for 2 minutes. 80% of the water was added to the compound and mixing continued for another 1.5 minutes. 20% of the required water was added to the mixture and the mixing process was continued for another 5 minutes.

The concrete was cast in 10 × 10 × 10, samples 10 × 10 × 5 and 5 × 5 × 5 cm moulds and compacted on the vibrating table. The moulds were covered with nylon and kept under laboratory conditions for 24 hours. Subsequently, the samples were immersed in water at a temperature of 18-21 °C for 27 days, under laboratory conditions. Subsequently, the samples were removed from the water, and 10 × 10 × 10 cm samples remained in the laboratory until their surface was dried and used for testing. Three samples were prepared from each compound for density testing. 10 × 10 × 5 and 5 × 5 × 5 cm samples were placed in an oven at 105 °C for 24 hours, to be completely dried and prepared for gamma and neutron irradiation.

Tablica 3 / Table 3

## SKŁADY MIESZANEK

## MIX DESIGN

Mix plan / Przygotowanie mieszanki	Symbol	Aggregate Kruszywo, kg/m <sup>3</sup>	Cement, kg/m <sup>3</sup>	Water / Woda, kg/m <sup>3</sup>	Boron carbide Węglik boru, kg/m <sup>3</sup>
Ordinary aggregate / Kruszywo zwykłe	C	1254	414	207	---
Hematite aggregate / Kruszywo hematytowe	H	1584	414	207	---
Hematite+2.5% boron carbide / Hematyt + 2,5% węglika boru	H2.5	1584	403.65	207	10.35
Hematite + 5% boron carbide / Hematyt + 5% węglika boru	H5	1584	393.30	207	20.70
Hematite + 10% boron carbide / Hematyt + 10% węglika boru	H10	1584	372.60	207	41.40
Magnetite aggregate / Kruszywo magnetytowe	M	1914	414	207	---
Magnetite+ 2.5% boron carbide / Magnetyt + 2,5% węglika boru	M2.5	1914	403.65	207	10.35
Magnetite + 5% boron carbide / Magnetyt + 5% węglika boru	M5	1914	393.30	207	20.70
Magnetite + 10% boron carbide / Magnetyt + 10% węglika boru	M10	1914	372.60	207	41.40



jako próba kontrolna, do dalszych porównań. Oznaczenia skrótów poszczególnych mieszanek przedstawiono w tabelicy 3. Należy zaznaczyć, że w przygotowaniu próbek uwzględniono absorpcję wody przez kruszywa i dodatki.

### 2.1.2. Przygotowanie próbek

Wykonanie i pielęgnację próbek wykonano zgodnie z zasadami normy ASTM C192, ACI 349-06, oraz wynikami niektórych badaczy (1,10).

Do wykonania próbek stosowano mieszarkę o pojemności 356 dm<sup>3</sup>. Najpierw wymieszano kruszywo w stanie wysuszonym, a następnie mieszano suchy cement, przez 2 minuty. Do mieszanki dodano 80% wody i mieszanie kontynuowano przez kolejne 1,5 minuty. Do mieszaniny dodano 20% wymaganej wody i kontynuowano proces mieszania przez kolejne 5 minut.

Beton wylano do form o wymiarach 10× 10× 10, 10 × 10 × 5 i 5 × 5 × 5 cm i zagęszczono na stole wibracyjnym. Formy przykryto nylonem i przechowywano w warunkach laboratoryjnych, przez 24 godziny. Następnie próbki umieszczono w wodzie, w temperaturze 18-21°C i przetrzymywano przez 27 dni, w warunkach laboratoryjnych. Następnie próbki wyjęto z wody, a próbki o wymiarach 10 × 10 × 10 cm pozostawiono w warunkach laboratoryjnych, do czasu wyschnięcia ich powierzchni i wykorzystano do badań. Z każdego składu przygotowano po trzy próbki do badania gęstości. Próbki o wymiarach 10 × 10 × 5 cm oraz 5 × 5 × 5 cm umieszczono w suszarce w temperaturze 105°C, na 24 godziny, w celu całkowitego wysuszenia i przygotowania do napromieniowania promieniami gamma i neutronami.

## 2.2. Metody

### 2.2.1. Badania gęstości

Suche próbki zważono z dokładnością do 0,01 g, w celu zmierzenia gęstości. Gęstość obliczono dzieląc otrzymaną masę przez objętość, zmierzoną suwmiarką z dokładnością do 0,1 mm. Wynik został oparty na średniej z badań, przeprowadzonych na trzech próbkach.

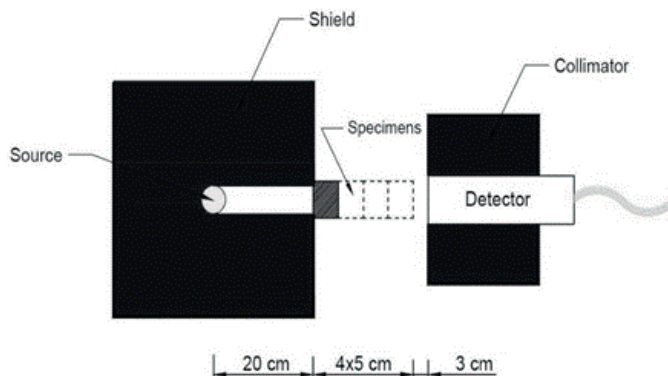
### 2.2.2. Pomiar tłumienia promieniowania gamma

Źródło Co-60 o aktywności 1 Curie [Ci], zastosowano do pomiaru masowego współczynnika tłumienia próbek betonu. Źródło to emituje dwa fotony o 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 napromieniowano przez dwie minuty, a geometrię pokazano na rys. 2.

Zastosowano następujące równanie (1):

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

gdzie:  $I_0$  – całkowita liczba fotonów emitowanych przez źródło,  $I$  – liczba fotonów przechodzących przez warstwę betonu,  $x$  – grubość



Rys. 2. Schemat układu do napromieniowania promieniami gamma

Fig. 2. Schematic view of gamma-ray irradiation layout

## 2.2. Methods

### 2.2.1. Density

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

### 2.2.2. Gamma rays attenuation measurement

A Co-60 source with 1 Curie [Ci] activity was used to measure the mass attenuation coefficient of concrete samples. This source emits two photons with energies of 1.173 MeV and 1.332 MeV. In this study, the higher-energy photon, 1.332 MeV, was the basis of measurement. The detector used was NaI [TI] with a diameter of 2 inches. A 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 the geometry is shown in Fig. 2.

The following equation was used (1):

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

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 g/cm<sup>3</sup> and  $\mu_m$  is the mass attenuation coefficient in cm<sup>2</sup>/g. Four 5 × 5 × 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 the 20 cm, but the distance between the source and detector did not change in any case. Therefore, to draw the diagram [I and  $\rho x$ ] 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.

próbki betonu w cm,  $\rho$  – gęstość w  $\text{g/cm}^3$ ,  $\mu_m$  – masowy współczynnik tłumienia w  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Z każdego składu mieszanki przygotowano cztery kostki o wymiarach  $5 \times 5 \times 5$  cm, do napromieniowania. W celu sporządzenia wykresu – I oraz  $\rho x$ , 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  $\mu_m$ , z tego procesu. Należy zaznaczyć, że wszystkie etapy napromieniania, powtarzano trzykrotnie na różnych powierzchniach kostek betonowych i przyjęto średnią z uzyskanych danych.

$\mu$  i HVL obliczono również przy użyciu następujących równań [1]:

$$\mu_m = \mu/\rho \quad [2]$$

$$\text{HVL} = \text{Ln}2/\mu \quad [3]$$

gdzie:  $\mu$  – liniowy współczynnik tłumienia w  $\text{cm}^{-1}$ , HVL – warstwa połowicznego osłabienia, w cm.

Dodatkowo przeprowadzono symulację Monte Carlo przy użyciu oprogramowania MCNP4C, w celu walidacji wyników doświadczalnych.

### 2.2.3. Pomiar tłumienia neutronów

Do pomiaru makroskopowego przekroju czynnego próbek betonu przyjęto źródło Am-Be 241, o aktywności 1 Ci [curie]. Zastosowany detektor był w rodzaju BF3, o średnicy 1 cala. Zastosowano napięcie 2000 V, wzmocnienie  $20 \times 5,8$  i kształtowanie 2 mikrosekundy. Dodatkowo zastosowano odpowiedni wzmacniacz i licznik, do zliczania przechodzących neutronów. Próbki były napromieniowane przez pięć minut, z geometrią przedstawioną na rys. 3.

$$N = N_0 e^{-\Sigma x} \quad (4)$$

Następnie, korzystając z równania [4], które jest bardzo podobne do równania [1], zmierzono  $\Sigma$ , która jest makroskopowym przekrojem czynnym i oznacza tłumienie neutronów, w jednostce bazowej  $\text{cm}^{-1}$ . W tym równaniu N jest liczbą neutronów przechodzących przez próbki betonu, a  $N_0$  jest liczbą neutronów emitowanych do próbek betonu.  $x$  jest grubością próbek betonu w cm (9,17). Należy zauważyć, że próbki betonu zmierzone w tym badaniu, były wykonane jako bloczki o wymiarach  $10 \times 10 \times 5$  cm. W związku z tym w obliczeniach przyjęto, że  $x$  jest równe 5 cm. Warto dodatkowo zaznaczyć, że z każdego projektu mieszanki wykonano i napromieniowano, po trzy bloczki betonowe. Dlatego też podany makroskopowy przekrój czynny był średnią z trzech próbek betonu, z każdego składu mieszanki, aby zwiększyć dokładność przedstawionych wyników.

Przeprowadzono również symulację doświadczeń napromieniania neutronami, za pomocą oprogramowania MCNP4C w celu oceny dokładności badań laboratoryjnych, przez porównanie wyników symulacji z wynikami badań.

$\mu$  and HVL were also calculated using the following equations [1]:

$$\mu_m = \mu/\rho \quad [2]$$

$$\text{HVL} = \text{Ln}2/\mu \quad [3]$$

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.

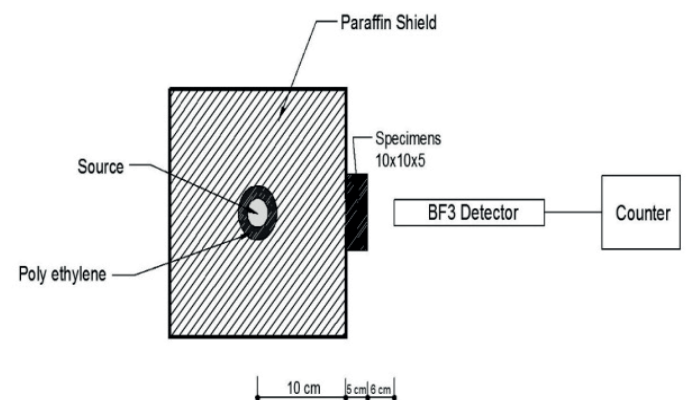
### 2.2.3. Neutron attenuation measurement

For measuring the macroscopic cross-section of concrete samples, Am-Be 241 source with 1 Ci [curie] activity was adopted. The detector employed was a BF3 type with 1 inch diameter. A voltage of 2000 V, a gain of  $20 \times 5,8$ , and a shaping of 2 microseconds were considered. Additionally, a suitable amplifier and counter were employed to count the passing neutrons. The samples were irradiated for five minutes with the geometry presented in Fig. 3.

$$N = N_0 e^{-\Sigma x} \quad (4)$$

Next, using equation [4], which is very similar to equation [1],  $\Sigma$ , which is the macroscopic cross section and denotes neutrons attenuation, was measured in the base unit of  $\text{cm}^{-1}$ . In this equation, N is the number of neutrons that pass through the concrete samples and  $N_0$  is the number of neutrons emitted into the concrete samples.  $x$  is also the thickness of concrete specimens in cm (9,17). Note that the concrete samples measured in this research were prepared as blocks with dimensions of  $10 \times 10 \times 5$  cm. Thus,  $x$  was considered equal to 5 cm in calculations. Three concrete blocks were made and irradiated from each mix design. Hence, the reported macroscopic cross-section was the average of the three concrete samples of each mix design, to improve the accuracy of the results displayed.

Also, the simulation of neutron irradiation experiments was conducted by MCNP4C software to assess the accuracy of laboratory operations by, comparing simulation results and test results.



Rys. 3. Schemat stanowiska do pomiaru pochłaniania neutronów

Fig. 3. Schematic view of neutron irradiation layout

### 3. Wyniki i omówienie

#### 3.1. Gęstość

Zgodnie z równaniami [1] i [2] można stwierdzić wpływ gęstości osłony betonowej na masowy współczynnik tłumienia i jego liniowy współczynnik tłumienia. Oczekuje się, że dzięki zastosowaniu 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 próbką zwykłego kruszywa, w celu lepszego określenia zakresu i tendencji zmian, a różnicę wyrażono w tabeli 4, w procentach. Jak wynika z tabelicy 4, w przypadku doboru kruszyw do betonu, opartych na hematycie i magnetycie, gęstość jest większa od betonu z kruszyw zwykłych, przy czym, wzrost ten dla kruszyw magnetytowych wyniósł 42%, i był większy niż dla kruszyw hematytowych, dla których wyniósł 20%. Różnice w gęstości kruszywa podane w tabelicy 1 mogą być przyczyną takich wyników. Przy zwiększaniu procentowej zawartości węgla boru w próbkach, gęstość ulegała zmniejszeniu. W przypadku zawartości 10% węgla boru, gęstość próbki zawierającej kruszywo hematytowe zmniejszyła się o około 16%, a w próbce zawierającej kruszywo magnetytowe była o 37,5% większa, niż gęstość próbki, ze zwykłym kruszywem. Oznacza to, że zastąpienie 10 % cementu węglikiem boru w betonie zawierającym kruszywo żelazne, spowodowało zmniejszenie jego gęstości o około 4 %. Podobnie było w przypadku kruszyw hematytowych i magnetytowych. W związku z tym, biorąc pod uwagę wyniki z tabelicy 1, spadek ten można przypisać mniejszej gęstości węgla boru niż innych materiałów, tworzących próbki betonu. Ariffin i in. (21) również odnotowali spadek gęstości w wyniku zastosowania węgla boru i wzrostu jego procentowego udziału w betonie. W badaniu tym zastosowano jednak konwencjonalne kruszywa (21).

Wyniki tego punktu pokazują, że zastosowanie kruszywa żelaznego, zwłaszcza magnetytu, ma bardzo dobry wpływ na tłumienie promieniowania gamma, a jednocześnie zastosowanie z nim, w razie potrzeby, węgla boru, zmniejsza ten efekt. Zmniejszenie to nie jest duże, nawet przy znacznych ilościach węgla boru, a otrzymany beton lepiej tłumy promieniowanie gamma, niż beton tradycyjny.

#### 3.2. Tłumienie promieniowania gamma

Rysunek 4 przedstawia współczynniki tłumienia masowego próbek betonowych, zmierzone podczas badania. Kruszywa żelazne, w szczególności magnetyt, zmniejszają współczynnik tłumienia masowego w betonie. Ta tendencja spadkowa utrzymywała się wraz ze wzrostem zawartości węgla boru. Na rys. 5 przedstawiono liniowe współczynniki tłumienia próbek, uzyskane w wyniku badań. Tendencja przyrostów na rysunku, w pełni przedstawia

### 3. Results and discussion

#### 3.1. 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 in the concrete, thus increasing the density of the concrete, the linear attenuation coefficient of the shielding concrete can be increased. Meanwhile, if boron compounds need to be used in shield construction, it is necessary to measure their effect on the density and therefore on the linear attenuation coefficient of concrete.

Table 4 presents the density of the samples. The density of samples containing iron aggregates and boron carbide was compared with the ordinary aggregate sample to better determine the extent and trend of the changes, and the difference was expressed as a percentage in the table 4. As shown in Table 4, when concrete aggregates were selected from hematite and magnetite, the density was higher than the ordinary aggregates concrete, and this increase for magnetite aggregates with 42% was larger than hematite aggregates with 20%. In practice, the aggregates density shown in Table 1 can be a valid reason causing these results. When the percentage of boron carbide in the samples increased, the density decreased. In the presence of 10% boron carbide, the density of concrete containing hematite aggregates is 16% higher and in the sample containing magnetite aggregates it is 37.5% higher than the density of the sample with ordinary aggregates. Replacing 10% of cement with boron carbide in concrete containing iron aggregates reduces its density by about 4 %. The same was true for hematite and magnetite aggregates. In this regard, considering the results shown in Table 1, this decrease can be attributed to the lower density of boron carbide than the other materials, forming concrete samples. Ariffin et al. (21) also reported a decrease in density due to the use of boron carbide and an increase in the percentage of concrete. However, in this study, conventional aggregates had been used.

The results of this section show that the application of iron aggregates, especially magnetite, 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 amounts of boron carbide, and the resulting concrete is more capable of attenuating gamma rays, than conventional concrete.

#### 3.2. Gamma ray attenuation

Figure 4 represents the coefficients of the mass attenuation of concrete samples measured. Iron aggregates, in particular magnetite, decrease the mass attenuation coefficient in the concrete. This decreasing trend continued with the increase in the boron carbide content. Fig. 5 shows the linear attenuation coefficients of the samples, obtained from the test. The incremental trend in the figure fully presents the effect of iron aggregates in a concrete

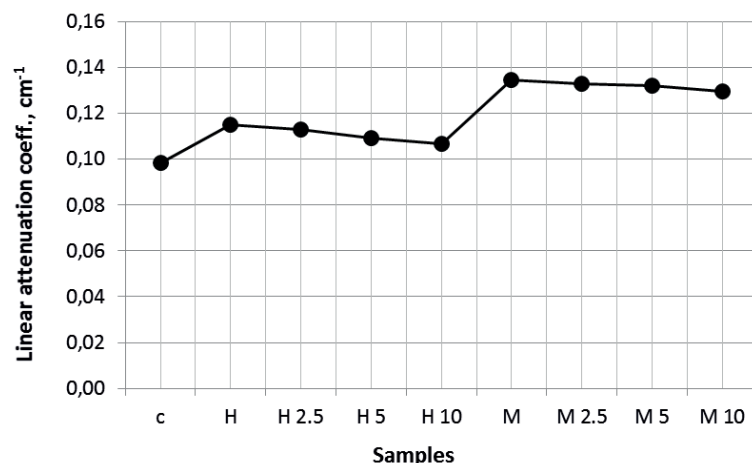
wpływ kruszywa żelaznego w próbce betonu, na tłumienie promieniowania gamma, w porównaniu z próbką betonu zwykłego. Ponadto wyraźnie zaznacza się rola węgliku boru w obniżaniu liniowego współczynnika tłumienia próbek betonowych, zawierających kruszywo żelazne. Biorąc pod uwagę liczbę atomową żelaza [26], 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 zakresie tłumienia promieniowania gamma.

Tablica 5 przedstawia liniowe współczynniki tłumienia próbek, uzyskane w wyniku doświadczeń i symulacji. W tabelicy tej obliczono również poziom błędu w dwóch wartościach  $\mu$ . Maksymalny błąd pomiędzy wynikami eksperymentu i symulacji, wykazał dokładność wyników doświadczalnych napromieniania. Dodatkowo obliczono i przedstawiono wartości HVL, uzyskane w badaniach. Wartości te stanowią połowę grubości osłony betonowej, wymaganej do kontroli i wiązania promieniowania gamma.

Aby to lepiej wyjaśnić porównanie liniowego współczynnika doświadczalnego tłumienia – przedstawionego w tabelicy 5, pomiędzy betonem zawierającym kruszywa hematytowe i magnetytowe, a betonem konwencjonalnym, pokazuje, że osiągnęły one odpowiednio 17% i 37% wzrost tłumienia promieniowania gamma. Oceniając bliżej liczby zawarte w tej tabelicy można zauważyć, że 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%.

### 3.3. Tłumienie neutronów

Rys. 6 przedstawia makroskopowy przekrój czynny wychwytu neutronów dla próbek betonu, zmierzony doświadczalnie. Jak można zauważyć, zarówno kruszywa żelazne, jak i węglik boru, zwiększyły makroskopowy przekrój czynny próbek. Wraz ze wzrostem zawartości węgliku boru w próbkach, wzrost ten utrzymywał się. Przyczynę tego można wyjaśnić mechanizmem ochrony przed neutronami, o którym mowa we wstępie. Bliższa analiza wyjaśnia,



Rys. 5. Liniowy współczynnik tłumienia próbek

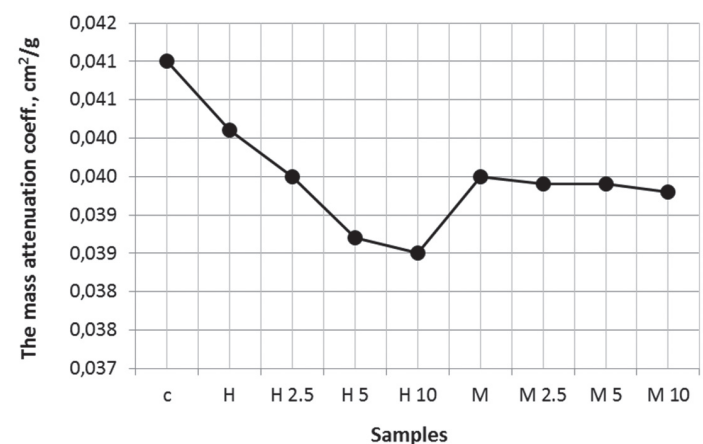
Fig. 5. Linear attenuation coefficients of the samples

Tablica 4 / Table 4

### GĘSTOŚĆ PRÓBEK

### DENSITY OF THE SAMPLES

Symbol	Density / Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	Density variation Zróżnicowanie 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



Rys. 4. Masowy współczynnik tłumienia próbek

Fig. 4. The mass attenuation coefficients of the samples

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 aggregates. 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 terms of gamma rays attenuation.

Table 5 represents the linear attenuation coefficients of the samples obtained by experimentation and simulation. In this table, the error rate between the two values of  $\mu$  was also calculated. The 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. These values represent half the thickness of the concrete shield, required to control and harness gamma rays.

To better explain this, comparison of the linear attenuation coefficient of the experiment, shown in the Table 5, between the concrete containing hematite and magnetite aggregates

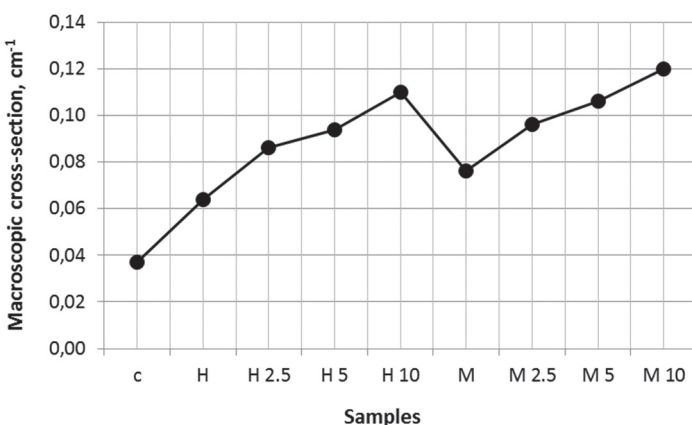


Symbol	$\mu_m, \text{cm}^2/\text{g}$	$\mu, \text{cm}^{-1}$			HVL, cm
		Experiment Prace doświadczalne	Simulation Symulacja	Error Błąd, %	
C	0.041	0.0982	0.0996	1.43	7.7
H	0.0401	0.1151	0.1129	1.94	6.0
H 2.5	0.0395	0.1128	0.1125	0.37	6.1
H 5	0.0387	0.1091	0.1108	1.53	6.4
H 10	0.0385	0.1069	0.1092	2.10	6.5
M	0.0395	0.1345	0.1345	0	5.2
M 2.5	0.0394	0.1329	0.1329	0	5.2
M 5	0.0394	0.1319	0.1321	0.15	5.3
M 10	0.0393	0.1294	0.1297	0.23	5.4

że makroskopowy przekrój czynny próbek betonu, zawierających kruszywo hematytowe, był o prawie 73% większy niż próbek betonu, zawierających zwykłe kruszywo. Natomiast w przypadku próbki zawierającej kruszywa magnetytowe, wzrost ten osiągnął 105%.

Ogólnie jednak główną rolę w zwiększeniu makroskopowego przekroju czynnego próbek betonu, a właściwie w zwiększeniu potencjału tłumienia neutronów przez próbki betonu, odegrał węgiel boru. Tablica 6 pokazuje skalę tego efektu. Bliższe przyjrzenie się liczbom w tablicy ujawnia, że dodatek 2,5, 5 i 10 % węgliku boru do próbek betonu zawierających kruszywo hematytowe, zwiększył ich makroskopowy przekrój czynny odpowiednio o 132, 154 i 197 %, w porównaniu z próbką betonu zawierającą zwykłe kruszywo. Natomiast w przypadku próbek betonu zawierających kruszywo magnetytowe, wzrost ten wynosił odpowiednio 159, 186 i 224 %. Wyniki te potwierdzają, że kruszywa żelazne, szczególnie magnetyt z węglikiem boru, bardzo dobrze sprawdzają się w tłumieniu neutronów.

Ponadto, aby ocenić dokładność wyników badań, w tablicy 6 przedstawiono również wartości makroskopowego przekroju czynnego próbek betonu, uzyskane metodą symulacji komputerowej.



Rys. 6. Makroskopowy przekrój czynny absorpcji neutronów badanych próbek betonowych

Fig. 6. Macroscopic cross-sections of the samples

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 aggregates, the linear attenuation coefficients in the sample concrete holding hematite aggregates declined by 2, 6 and 8%, respectively. But the reduction in samples containing magnetite aggregates was 2, 3 and 5 percent, respectively.

### 3.3. Neutron attenuation

Fig. 6 exhibits the macroscopic cross-section of the concrete samples, measured by the experiment. As can be observed, both iron aggregates and boron carbide increased the macroscopic cross-section of the samples. With the increasing of boron carbide content in the samples, this increase lasted. The reason for this can be located in the neutron protection mechanism mentioned in the Introduction section. A closer inspection reveals that the macroscopic cross-section of concrete samples containing hematite aggregates was nearly 73% more than that of concrete samples, containing ordinary aggregates. But for the sample bearing magnetite aggregates, this increase reached 105%.

However, in general, the chief role in increasing the macroscopic cross-section of concrete samples or, in fact, increasing the neutron attenuation potential of concrete samples, was because of boron carbide. Table 6 shows the degree of this effect. A closer examination at the table numbers unveils that the addition of 2.5, 5 and 10 % of boron carbide to concrete samples including hematite aggregates, increased their macroscopic cross-section by 132, 154, and 197 %, respectively, compared to the concrete sample containing ordinary aggregates. But for concrete samples containing magnetite aggregates, this increase was by 159, 186, and 224 %, respectively. These results confirm that iron aggregates, particularly magnetite with boron carbide, function very well in neutron attenuation.

Besides, to estimate the accuracy of the test results, the macroscopic cross-section values of the concrete samples obtained from the computer simulation method, are also displayed in the table 6. Moreover, the error rate between the macroscopic cross-sections of the samples collected from the experiment and simulation was displayed in percentages in the table. As can be noticed, there is an error between 6 to 20 % in the table, which is mostly due to the intricacy of the neutron behaviour, its energy divisions, and the different mechanisms of its interaction with the matter. Also, the conditions, method, and testing tools affect accuracy.

A more profound look at the results of this section and the previous section explains that the presence of boron carbide and its incre-

Ponadto poziom błędu pomiędzy makroskopowymi przekrojami czynnymi próbek pobranych w doświadczeniach i symulacji, został przedstawiony w procentach. Jak można zauważyć, występuje błąd od 6 do 20 %, co wynika głównie ze złożoności zachowania się neutronu, jego podziałów energetycznych i różnych mechanizmów jego interakcji, z materiałem. Również warunki, metoda i narzędzia badawcze, mają wpływ na dokładność.

Bardziej dogłębne spojrzenie na wyniki tego rozdziału i poprzedniego wyjaśnia, że obecność węgla boru i jego zwiększenie do maksymalnie 10% w betonie zawierającym kruszywo żelazne, zwiększyło tłumienie neutronów o 120%, ale z drugiej strony doprowadziło do utraty tłumienia promieniowania gamma o 5 do 8%. Dlatego, krótko mówiąc, pomysł zastosowania w betonie kruszyw żelaznych, w szczególności magnetytu i węgla boru, jest możliwy do jednoczesnego tłumienia promieni gamma i neutronów, z wysokim procentem sukcesu. Wymagane jest jedynie, aby projektant osłony uwzględnił pozytywny wpływ węgla boru na tłumienie neutronów w takim samym stopniu, jak ograniczone zmniejszenie tłumienia promieniowania gamma spowodowane przez ten materiał.

#### 4. Wnioski

Uzyskane wyniki przeprowadzonych doświadczeń pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Gdy kruszywo hematytowe zastępuje zwykłe kruszywo w betonie, jego gęstość wzrasta o 20%, liniowy współczynnik tłumienia o 17%, a przekrój czynny wychwyty neutronów aż o 73%.
2. Gdy kruszywo magnetytowe zastąpiło zwykłe kruszywo w betonie, gęstość wzrosła o 42%, liniowy współczynnik tłumienia wzrósł o 37%, a przekrój czynny wychwyty neutronów wzrósł o 105%.
3. Zawartość maksymalna 10 % węgla boru, wraz z kruszywem żelaznym w betonie, zwiększyła przekrój makroskopowy o 120%. Jednak dodatek węgla boru zmniejszył gęstość betonu o 4%, a liniowy współczynnik tłumienia od 5 do 8%.
4. Znaczny wzrost, o 120%, makroskopowego przekroju czynnego wychwyty neutronów betonu i jego powiązanie z ograniczonym spadkiem o 5% do 8% liniowego współczynnika tłumienia promieniowania gamma oznacza, że beton przedstawiony w niniejszym badaniu może w warstwie osłonowej jednocześnie spełniać funkcję ochrony przed promieniowaniem gamma i neutronami termicznymi.
5. Jeśli rozważy się wybór kruszywa żelaznego pomiędzy hematytem a magnetytem, dla ochrony przed promieniowaniem, wyniki przeprowadzonych badań zdecydowanie wskazują na magnetyt.
6. Wyniki badań promieniowania gamma i neutronowego oraz wyniki ich symulacji metodą Monte Carlo, pokrywały się z wynikami uzyskanymi za pomocą programu MCNP4C. Maksymalna różnica pomiędzy wynikami, uzyskanymi za

Tablica 6 / Table 6

WYNIKI BADAŃ I SYMULACJI NAPROMIENIOWANIA NEUTRONAMI  
RESULTS OF NEUTRON IRRADIATION TESTING AND SIMULATION

Symbol	$\Sigma$ , cm <sup>-1</sup>		
	Experiment Prace doświadczalne	Simulation Symulacja	Error Błąd, %
C	0.037	0.032	15.6
H	0.064	0.057	12.3
H2.5	0.086	0.098	14
H5	0.094	0.113	20.2
H10	0.110	0.124	12.7
M	0.076	0.066	15.2
M2.5	0.096	0.102	6.25
M5	0.106	0.118	11.3
M10	0.120	0.128	6.7

ase to a maximum of 10% in concrete containing iron aggregates advanced the neutron attenuation by 120%, but on the other hand it leads to 5 to 8 % of gamma attenuation loss. Therefore, in brief, the idea of applying iron aggregates, notably magnetite and boron carbide in concrete, is possible for the simultaneous attenuation of gamma rays and neutrons, with a high success percentage. It is only required for the shielding designer to take into account the positive effect of boron carbide on neutron attenuation as much, as the limited reduction in gamma-ray attenuation caused by this material.

#### 4. Conclusion

The following results were obtained from the current study:

1. When hematite aggregates replaced the ordinary aggregates in concrete, the density increased by 20 %, linear attenuation coefficient increased by 17 %, and macroscopic cross-section increased by 73 %.
2. When magnetite aggregates replaced the ordinary aggregates in concrete, the density increased by 42 %, linear attenuation coefficient increased by 37 %, and macroscopic cross-section increased by 105%.
3. Presence of maximum 10 percent of boron carbide, along with iron aggregates in concrete, increased macroscopic cross-section by 120%. It declined the density by 4% and linear attenuation coefficient by between 5 to 8%.
4. A clear increase of 120 percent of the macroscopic cross-section of the pick up neutrons in concrete and its relationship with a limited decrease of 5 to 8% of the linear gamma radiation attenuation coefficient, means that the concrete presented in this study can perform gamma radiation - protection against radiation and thermal neutrons, in the shielding layer simultaneously.
5. If the choice of iron aggregates between hematite and ma-

pomocą tych metod dla promieniowania gamma wynosił 2%, a dla neutronowego - 20%.

## Podziękowania

Autorzy chcieliby uznać i docenić wysiłki dr Babaka Shirani, szanowanego członka wydziału na Uniwersytecie Isfahan, pana Behnam Jandaghian i pana Golabi, dyrektora wykonawczego kopalni Kooh Serahan.

## Literatura / References

1. M.G. El-Samrah, MA. Abdel-Rahman, A.M. Kany, Study characteristics of new concrete mixes and their mechanical, physical, and gamma radiation attenuation features, *J. Inorg. General Chem.* **644**, 92-99(2018). <https://doi.org/10.1002/zaac.201700420>
2. E. Mansouri, A. Mesbahi, R. Malekzadeh, A. Mansouri, Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nanoparticle concentration. *Radiat Environ Biophys*, **59**, 583-600(2020). <https://doi.org/10.1007/s00411-020-00865-8>
3. 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>
4. 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>
5. 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>
6. 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).
7. 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>
8. B. Oto, A. Gür, Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate, *Int. J. Phys. Sci.* **8**(8), 310-314(2013). <https://doi.org/10.5897/IJPS2013.3854>
9. 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>

gnetite for radiation protection is considered, the results of this research, with the obtained numbers, strongly suggest magnetite.

6. The results of gamma and neutron 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-ray was 2% and for neutron was 20%.

## 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 KoohSerahan mine.

10. O. Gencil, W. Brostow, C. Ozel, M. Filiz, Concretes containing hematite for use as shielding barriers. *Mater. Sci.* **16**(3), 249-256(2010).
11. K. Saidani, L. Ajam, MB. 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>
12. 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>
13. I. Akkurt, H. Akyıldırım, B. Mavi, S. Kilincarslan, C. Basyigit, Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate. *Ann. Nucl. Energy* **37**(7), 910-914(2010a). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.04.001>
14. I. Akkurt, H. Akyıldırım, 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>
15. V.A. Kumar, P.A. Kumar, V. Aravinth, 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).
16. 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>
17. 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>
18. 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>
19. D. Sariyer, R. Küçer, N. Küçer, Neutron shielding properties of concretes containing boron carbide and ferro–boron, *Proc. Social. Behavioral. Sci.* **195**, 1752-1756(2015). <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.320>
20. Y. Abdullah, M.R. Yusof, A. Muhamad, Z. Samsu, N. Abdullah, Cement-boron carbide concrete as radiation shielding material. *J. Nucl. Rel. Tech.* **7**(2), 74-79(2010).
21. F.N. Ariffin, Y. Abdullah, R. Shamsudin, R. Hamid, S.H. Ahmad, Effect of Boron Carbide addition on the physical, mechanical and microstructural properties of Portland cement concrete. *J. App. Sci.* **11**(22), 3738-3743(2011). <https://doi.org/10.3923/jas.2011.3738.3743>
22. M. Safamehr, M. Izadinia, S.H. Hashemi, S. Koohestani, NanoSilica role in concrete containing iron oxides aggregates and boron carbide as a shield against gamma rays. *Cem. Wapno Beton* **26**(3), 218-232(2021). <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.3.4>