

Właściwości ochronne kruszyw żelazofosforowych w betonie ciężkim, narażonym na promieniowanie gamma z cezu-137

Ferrophosphorus aggregates shielding properties on heavy concrete exposed to gamma-rays, cesium-137 source

Reza Farokhzad*, Amir Dadashi, Ashkan Sohrabi

¹ Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

² Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

³ Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

*Corresponding author: R. Farokhzad, e-mail: R.farokhzad@qiau.ac.ir

Streszczenie

Celem pracy jest zbadanie liniowego współczynnika tłumienia oraz gęstości próbek wykonanych z żelazofosforu i typowych kruszyw, proszku stalowego oraz proszku nano-krzemionki, w różnych proporcjach. W związku z tym przygotowano 60 próbek betonowych o wymiarach 15×15×15 cm i różnej zawartości wymienionych materiałów. Po pomiarze gęstości wykonano pomiary liniowych współczynników tłumienia próbek poddanych promieniowaniu gamma, emitowanemu ze źródła cezu-137. Wyniki badań wykazały, że żelazofosfor był najbardziej efektywnym czynnikiem zwiększającym liniowy współczynnik tłumienia i gęstość betonu. Po żelazofosforze, proszki stali i nano-krzemionki, aczkolwiek w znacznie mniejszym stopniu niż żelazofosfor, zwiększyły gęstość i liniowy współczynnik tłumienia. Największą gęstość – 4395 kg/m³ miała próbka wykonana w 100% z żelazokruszyw i 20% proszku stalowego, bez nano-krzemionki, a najmniejszą gęstość – 2269 kg/m³, próbka wykonana w 100% z kruszywa typowego i 10% proszku stalowego, bez nano-krzemionki. Największy współczynnik tłumienia liniowego – 0,295 cm⁻¹ dotyczył próbki wykonanej z 65% z żelazofosforu, 30% z proszku stalowego i 5% z proszku nano-krzemionki. Najmniejszy współczynnik tłumienia liniowego – 0,151 cm⁻¹ miała próbka wykonana w 8%, z nanokrzemionki, bez dodatku żelazofosforu i proszku stalowego. Wyniki badań wykazały, że gęstość betonu jest bezpośrednio skorelowana z liniowym współczynnikiem tłumienia.

Słowa kluczowe: beton ciężki; nanoproszek krzemionkowy; kruszywo żelazofosforowe; liniowy współczynnik tłumienia

Summary

This study aims to investigate the linear attenuation coefficient and density of samples made of ferrophosphorus and typical aggregates, steel powder, and nanosilica powder in different ratios. Therefore, 60 concrete samples with dimensions of 15×15×15 cm and different contents of the mentioned materials were prepared. After the density was measured, the linear attenuation coefficients of the samples were measured by gamma radiation emitted from the cesium-137 source. The results showed that ferrophosphorus was the most effective factor in increasing the linear attenuation coefficient and the density of the concrete. After ferrophosphorus, steel and nanosilica powder – although much less than ferrophosphorus – increased the density and linear attenuation coefficient. The sample made of 100% ferrophosphorus aggregate and 20% steel powder without nanosilica powder had the highest density of 4395 kg/m³, and the sample made of 100% typical aggregate and 10% steel powder, without nanosilica powder, had the lowest density equal to 2269 kg/m³. The highest linear attenuation coefficient – 0.295 was related to the sample made of 100% ferrophosphorus, 30% steel powder, and 5% nanosilica powder. The lowest linear attenuation coefficient – 0.151 was related to the sample made of 8% nanosilica, without the ferrophosphorus and steel powder. The results indicated that the concrete density was directly correlated with the linear attenuation coefficient.

Keywords: heavy-mass concrete; nanosilica powder; ferrophosphorus aggregate; linear attenuation coefficient

1. Wprowadzenie

Dobrze poznane są nieodwracalne, a nawet śmiertelne skutki oddziaływania emisji promieniotwórczych na człowieka w różnych środowiskach, w tym w obiektach jądrowych, ośrodkach fizjoterapii i medycyny, laboratoriach badawczych fizyki jądrowej oraz we wszystkich ośrodkach, w których pracujący ludzie są narażeni na promieniowanie. Z tego powodu wielu inżynierów budownictwa lądowego i wodnego oraz jądrowego podjęło współpracę, w celu wykorzystania cennych właściwości betonu ciężkiego, do budowy ścian osłonowych przed szkodliwym promieniowaniem. Według American Concrete Institute [ACI] betonem ciężkim nazywamy beton o masie właściwej większej od masy właściwej betonu wykonanego z typowych kruszyw. Jest on zwykle wykonywany z kruszyw ciężkich i stosowany jako osłona przed promieniowaniem (1-3). Gęstość betonu ciężkiego wynosi od 3500 do 6000 kg/cm³, czyli około 1,5-2,5 razy więcej, niż typowego betonu (4-7). Wraz z postępem nauki, inżynierowie budownictwa jądrowego oraz lądowego i wodnego zawsze starali się projektować materiały wykorzystujące kruszywa, które mogą odgrywać rolę ochronną przed promieniowaniem X i gamma. Beton ciężki jest uważany za wartościowy materiał, który w dużym stopniu zapewnia pożądane warunki. Ciężkie kruszywa, w tym baryt, hematyt, magnetyt, żelazofosfor i proszek stalowy oraz bizmut, zastępują piasek w produkcji ciężkiego betonu. Ten rodzaj betonu jest stosowany w celu ochrony przed promieniowaniem rentgenowskim i gamma oraz jest głównie stosowany w obiektach jądrowych lub wszelkich budowlach, w których występują emisje radioaktywne.

Przeprowadzono wiele badań nad wykorzystaniem betonu ciężkiego do ochrony przed promieniowaniem. Kharita et al. (8) do betonu osłonowego z kruszyw hematytowych, stosowali różny dodatek proszku węglowego, w celu zbadania jego właściwości osłonowych. Określono również właściwości mechaniczne i absorpcję promieniowania betonu. Wyniki wykazały, że dodanie 6% masowych proszku węglowego do betonu, może zwiększyć jego wytrzymałość o około 15%. Skuteczność osłony przed promieniowaniem gamma i neutronowym malała wraz ze wzrostem zawartości proszku węglowego. Sharma et al. (9) badali właściwości mechaniczne i osłonowe betonu zbrojonego włóknami, zawierającego włókna stalowe, z ołowiu oraz kombinację tych dwóch rodzajów włókien – włókna hybrydowe. Zbadano wytrzymałość na ściskanie i zginanie, na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz właściwości osłonowe przed promieniowaniem gamma. Wyniki badań wykazały, że włókna hybrydowe znacznie poprawiają właściwości mechaniczne i osłonowe przed promieniowaniem. Celem pracy jest zbadanie liniowego współczynnika tłumienia oraz gęstości próbek, wykonanych z 25%, 50%, 75% i 100% żelazofosforu i typowych kruszyw, 10%, 20% i 30% proszku stalowego oraz 5%, 8% nano-krzemionki w proszku.

2. Metody doświadczalne

2.1. Materiały

Do wykonania próbek stosowano typowe łamane kruszywa grube i drobne oraz syntetyczne, ciężkie kruszywa żelazofosforowe,

1. Introduction

The irreversible and even lethal effects of radioactive emissions on humans in various environments, including nuclear facilities, physiotherapy and medical centers, nuclear physics research laboratories, and all the centers in which working people are exposed to radiation, are well understood. For this reason, many civil and nuclear engineers have cooperated to use valuable properties of the heavy mass concrete, for constructing shielding walls against harmful radiation. According to the American Concrete Institute [ACI], heavy-mass concrete is defined as concrete with a specific gravity higher than that of concrete made of typical aggregates, which is usually prepared by heavy-mass aggregates and applied as a shield against radiation (1-3). The specific gravity of heavy-mass concrete is approximately 3500-6000 kg/cm³, which is approximately 1.5-2.5 times higher than that of typical concrete (4-7). With the progress of science, nuclear and civil engineers have always tried to design materials using aggregates, which can play a protective role against radiation such as X and gamma rays. Heavy mass concrete is considered a valuable material that has provided the required conditions to the large extent. Heavy mass aggregates including barite, hematite, magnetite, ferrophosphorus, and elements such as steel powder and bismuth are substituted sand, to make heavy mass concrete. This type of concrete is applied to prevent X-rays, gamma rays and other radiation sources, and is basically used in nuclear facilities or any structure where there are radioactive emissions.

Numerous studies have been conducted on the use of heavy-mass concrete to protect against radiation. Kharita et al. (8) added carbon powder in different percentages to shielding concrete made of hematite aggregates, to examine its shielding properties. The mechanical properties and radiation absorption of the prepared concrete were also determined. The results indicated that adding 6% carbon powder, by mass, to concrete could increase its strength by about 15%. The shielding efficiency against gamma and neutron radiation decreased with increasing carbon powder. Sharma et al. (9) studied the mechanical and shielding properties of fiber-reinforced concrete, containing steel fibers, lead fibers, and the combination of these two hybrid fibers. The compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength as well as the gamma radiation shielding, were investigated. The results showed that the hybrid fibers significantly increased both mechanical and radiation shielding properties. The present study aims to examine the linear attenuation coefficient and density of the samples made of 25%, 50%, 75%, and 100% ferrophosphorus and typical aggregates, 10%, 20%, as well as 30% of steel powder and 5%, 8% of nanosilica powder.

2. Experiments

2.1. Materials

In order to produce the samples, typical coarse and fine aggregates of crushed type, and synthetic heavy-mass ferrophosphorus aggre-

z Teheranu. Po pokruszeniu w Irańskim Centrum Badań Przetwarzania Mineralów (IMPRC), zostały one sklasyfikowane i zastosowane. Czystość proszku stalowego wynosiła 96,8%.

2.2. Badania wymagane przy projektowaniu mieszanki

2.2.1. Badanie uziarnienia kruszyw

W pierwszej kolejności wykonano badania żelazofosforu oraz typowe badania uziarnienia kruszyw, w celu ujednolicenia ich składu w poszczególnych próbkach (10). Stosując krajowy skład mieszanki znany w Iranie, do przygotowania próbek wykorzystano odpowiednie zalecenia dotyczące metody wytwarzania betonu ciężkiego, w oparciu o krzywe uziarnienia grubego kruszywa. Oceniono proponowane pola dobrego uziarnienia kruszywa, składające się z czterech stref. Następnie wykorzystano pole dobrego uziarnienia kruszywa w strefie II, którą stanowiło uziarnienie betonu pompowalnego, z gruboziarnistym kruszywem (11). Wszystkie próby wykonywane na materiałach, były zgodne z normami ASTM. Zgodnie z metodą ASTM C136-84a sortowano 5 kg kruszywa typowego i żelazofosforowego. Rys. 1 i 2 przedstawiają odpowiednio wyniki uziarnienia kruszywa typowego i żelazofosforowego.

2.2.2. Badanie ekwiwalentu piasku [EP]

Badania EP wykonano na typowych i żelazofosforowych kruszywach drobnych, zgodnie z normą ASTM D2419-87, a ich wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Zgodnie z wytycznymi ASTM do betonu mogą być stosowane kruszywa drobne, o EP większym, lub równym 75%. Z tego względu kruszywa te mogły być stosowane do wykonania próbek, zarówno pojedynczo, jak i w mieszaninach (12).

2.2.3. Badanie metodą Los Angeles

Badanie metodą Los Angeles wykonano na typowych i żelazofosforowych kruszywach grubych, zgodnie z normą ASTM C131-89, a ich wyniki przedstawiono w tabeli 2.

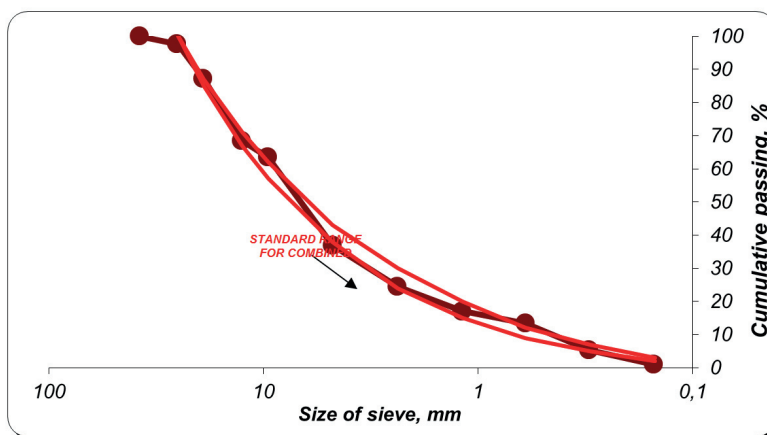
Zgodnie z normą ASTM C131-89 przyjęto masę materiałową obu kruszyw 5 kg i zastosowano 12 kul z ołowiu. Wyniki badań wykazały, że kruszywo żelazofosforowe nie wykazuje odporności na uderzenia i ścieranie oraz łatwo przechodzi w pył. Zastosowane

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI BADANIA EKWIWALENTU PIASKU

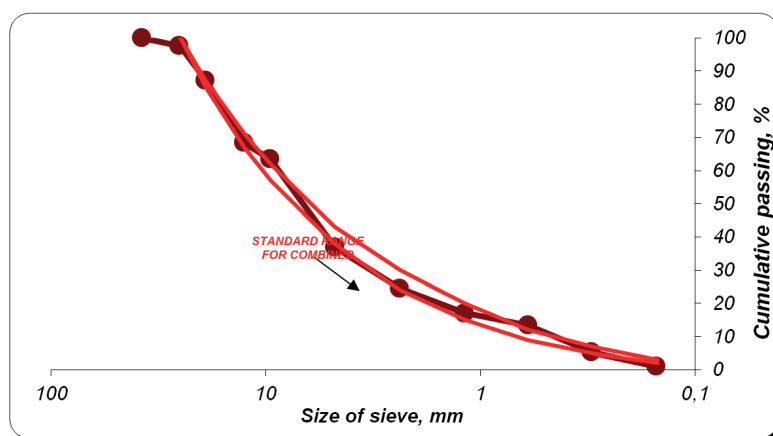
THE RESULTS OF SAND EQUIVALENT TEST

Aggregate / Kruszywo	Sand equivalent Ekwivalent piaskowy, %
Typical aggregate / Kruszywo typowe	83
Ferrophosphorus aggregate / Kruszywo żelazofosforowe	77



Rys. 1. Krzywa uziarnienia kruszywa typowego, po modyfikacji uziarnienia

Fig. 1. Typical aggregate grading curve after gradation modification



Rys. 2. Krzywa uziarnienia kruszywa żelazofosforowego, po modyfikacji uziarnienia

Fig. 2. Ferrophosphorus aggregate grading curve after gradation modification

gates were prepared from Tehran. After being crushed at the Iran Mineral Processing Research Center [IMPRC], they were graded and applied. The steel powder had a purity of 96.8%.

2.2. Required tests for mix design

2.2.1. Aggregate gradation test

First, the gradation tests of ferrophosphorus and typical aggregate were performed to homogenize the aggregate composition, in different samples (10). Referring to the national mix design of Iran, relevant recommendations on how to make heavy-mass concrete, based on coarse-grained classification curves, were used to prepare the samples. The proposed grading zone envelope, consisting of four zones, was examined. Then, the zone II grading curve envelope, which was the pumpable coarse-grained concrete grading, was used (11). All the tests were performed on the materials according to the ASTM standards. According to the ASTM C136-84a test method, 5 kg of typical and ferrophosphorus aggregates were classified. Figs.

Tablica 2 / Table 2

BADANIE METODĄ LOS ANGELES

LOS ANGELES TEST

Material / Materiał	Result / Wynik, %
Powder of aggregate / Proszek z kruszywa	16.5
Powder of ferrophosphorus aggregate Proszek z kruszywa żelazofosforowego	93

kruszywo typowe, wykazało jednak odpowiednią odporność na uderzenia i ścieranie, podczas badań.

2.2.4. Badanie kruszywa popękanego

Badanie procentowego udziału kruszywa łamanego wykonano zgodnie z normą ASTM-D5821-2001, a jego wyniki przedstawiono w tabeli 3.

2.2.5. Badanie gęstości i nasiąkliwości

Badania gęstości i nasiąkliwości obu rodzajów kruszyw przeprowadzono zgodnie z normami ASTM-C128-88 i ASTM-C127-88, a ich wyniki przedstawiono w tablicy 4.

2.2.6. Badanie gęstości nasypowej

Badania gęstości nasypowej obu rodzajów kruszyw przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C29/C29M-90, a ich wyniki przedstawiono w tablicy 5.

2.2.7. Badanie gęstości ziarna cementu i nanokrzemionki

Badanie gęstości cementu i nanokrzemionki przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C188-89. Gęstości cementu i nanokrzemionki wynosiły odpowiednio 2,76 i 2,38 g/cm³.

2.3. Skład mieszanki

Po zapoznaniu się z wynikami badań, skład mieszanki dla każdej próbki, opracowano na podstawie krajowego składu mieszanki w Iranie, z uwzględnieniem zawartości składników betonu. Kruszywo typowe zastąpiono kruszywem żelazofosforowym w proporcjach 25%, 50%, 75% i 100%, piasek zastąpiono proszkiem stalowym w proporcjach 10%, 20% i 30%, w stosunku do masy cementu. Nanokrzemionkę dodawano w ilości 5% i 8%, w stosunku do masy cementu. Stosunek wody do cementu przyjęto na

Tablica 4 / Table 4

GĘSTOŚĆ I NASIĄKLIWOŚĆ KRUSZYWA TYPOWEGO I ŻELAZOFOSFOROWEGO

DENSITY AND WATER ABSORPTION OF TYPICAL AND FERROPHOSPHORUS AGGREGATES

Type of aggregate Rodzaj kruszywa	Water absorption percentage Nasiąkliwość, %	Apparent density Gęstość pozorna, g/cm ³	Relative density, SSD Gęstość względna, SSD, -	Relative density OD Gęstość względna OD, -
Coarse aggregate	1.69	2.58	2.52	2.48
Coarse ferrophosphorus	0.50	5.20	5.10	5.14
Fine aggregate	4.49	2.48	2.33	2.23
Fine ferrophosphorus	0.7	5.25	5.18	5.05

Tablica 3 / Table 3

BADANIE PROCENTOWEJ ZAWARTOŚCI KRUSZYWA POPEKANEGO

FRACTURED AGGREGATE PERCENTAGE TEST

Type of aggregate / Rodzaj kruszywa	Result / Wynik, %
Normal aggregate / Kruszywo typowe	54
Ferrophosphorus aggregate Kruszywo żelazofosforowe	100

1 and 2 indicate the results of the typical and ferrophosphorus aggregate grading, respectively.

2.2.2. Sand equivalent [SE] test

SE test was performed on typical and the ferrophosphorus fine aggregates according to ASTM D2419-87 standard, the results of which are presented in Table 1.

According to ASTM guidelines, fine aggregates with SE greater than or equal to 75%, can be used in concrete. Therefore, the aggregates could be used both individually and in combination with each other, to make the samples (12).

2.2.3. Los Angeles test

Los Angeles test was performed on typical and the ferrophosphorus coarse aggregates, according to ASTM C131-89 standard, the results of which are described in Table 2.

According to ASTM C131-89 standard, the material mass of both aggregates was considered to be 5 kg and 12 lead bullets, were employed. The results indicated that the ferrophosphorus aggregate had no resistance to impact and abrasion and easily turned into dust. However, the used typical aggregate showed reasonable resistance to impact and abrasion, during the tests.

2.2.4. Fractured aggregate percentage test

Fractured aggregate percentage test was performed according to ASTM-D5821-2001 standard, the results of which are presented in Table 3.

2.2.5. Density and water absorption test

The density and water absorption tests were performed on both types of aggregates, according to ASTM-C128-88 and ASTM-

Aggregate type / Rodzaj kruszywa	Density / Gęstość, kg/m ³
Coarse aggregate / Grube kruszywo	1531
Fine aggregate / Drobne kruszywo	1713
Coarse ferrophosphorus / Grube żelazofosforowe	4050
Fine ferrophosphorus / Drobne żelazofosforowe	4155

poziomie 0,4. Mieszając różne proporcje materiałów, wykonano 60 próbek o wymiarach 15×15×15 cm, w celu określenia liniowego współczynnika tłumienia i gęstości betonu. Zgodnie z wynikami badań uziarnienia kruszywa, do projektu mieszanki przyjęto wytrzymałość betonu 250 kg/cm², maksymalny wymiar kruszywa 19 mm, zawartość cementu 350 kg/m³, stosunek wody do cementu 0,4. Jak pokazano w tabeli 6, 60 mieszanek wyznaczono przy różnych ich składach. Skrót w każdym składzie mieszanki wskazuje na zawartość każdego z zastosowanych materiałów, tak więc **ph** oznacza kruszywo żelazofosforowe, **fe** oznacza proszek stalowy, a **na** oznacza proszek z nano-krzemionki. Na przykład **ph50fe10na8** oznacza zastosowanie 50% kruszywa żelazofosforowego, 50% kruszywa typowego i 10% proszku stalowego, w miejsce piasku, w przeliczeniu na masę cementu, 8% proszku z nano-krzemionki, zastępującego cement, także w przeliczeniu na masę cementu.

3. Przygotowanie próbek

Po przygotowaniu składu mieszanek wykonano próbki według tabeli 6. Materiały z każdej próbki ważono według podanych wartości i mieszano ręcznie przez 15-20 min. Następnie wlewano je do sześciennych form i zagęszczano specjalnym prętym w trzech etapach, po 25 razy w każdym. Próbki przechowywano w formach w temperaturze 24 °C (temperatura laboratorium) przez 24 h, a następnie umieszczono w zbiorniku w wodzie, na 28 dni, w celu twardnienia.

4. Badanie promieniowania

Próbki wyjmowano z wody po 28 dniach i przeniesiono do Laboratorium Fizyki Jądrowej Uniwersytetu (UMA), w celu poddania ich promieniowaniu gamma, emitowanemu ze źródła cezu-137. W dalszej części opisany jest proces badania promieniowania. Jak widać na rys. 3, źródłem promieniowania gamma był cez-137, który promieniował z odległości 1 m, przy dawce 7,115 mSv/hr.

Źródło to wykazywało aktywność 5 µCi i 3,7 MBq oraz energię 662 keV. Źródło punktowe znajdowało się w odległości 1 cm, od środka szerokości próbki. Osłony z ołowiu zostały umieszczone po obu bokach źródła oraz pod i nad nim, w celu zapewnienia ochrony (rys. 4) (13). Wysokość kolimatora źródła i detektora była regulowana przed ekspozycją próbek promieniowaniem gamma w laboratorium, co mogło mieć wpływ na intensywność promienio-

-C127-88 standards, the results of which are presented in Table 4.

2.2.6. Bulk specific gravity test

The bulk specific gravity test was performed on both types of aggregates according to ASTM C29/C29M-90, the results of which are presented in Table 5.

2.2.7. Cement and nanosilica particle density test

The cement and nanosilica particle density test was performed according to ASTM C188-89. The results for cement and nanosilica particle densities were obtained as 2.76 and 2.38 g/cm³, respectively.

2.3. Mix design

After reviewing the test results, the mix design of each sample was obtained, using the national mix design of Iran, considering the content of concrete compounds. The ferrophosphorus aggregate was substituting the typical aggregate in ratios of 25%, 50%, 75% and 100%, the steel powder replaced sand in ratios of 10%, 20% and 30% by cement mass, and the nanosilica powder was used in ratios of 5% and 8%, by the cement mass used. The water to cement ratio was considered to be 0.4. By mixing different ratios of materials, 60 samples were made with dimensions of 15×15×15 cm, to determine the linear attenuation coefficient and the density of the concrete. According to the results of grading tests performed on the aggregates, the input data used to obtain the mix design included the concrete strength of 250 kg/cm², the maximum aggregate size of 19 mm, cement content of 350 kg/m³, and water to cement ratio of 0.4. As shown in the Table 6, 60 mix proportions were determined, at different compound ratios. The abbreviations in each mix design indicate the content of each material used, so that 'Ph' denotes ferrophosphorus aggregate, 'Fe' represents steel powder, and 'Na' denotes nanosilica powder per mix design; for example, Ph50Fe10Na8 indicates 50% of ferrophosphorus aggregate, 50% typical aggregate, and 10% steel powder are substituting sand by cement mass, and 8% nanosilica powder is substituting cement in terms of cement mass.

3. Sample preparation

After preparing the mix design, the samples were made according to Table 6. The materials of each sample were weighed according to the specified values and manually mixed for 15-20 min. Then they were poured into cubic molds and compressed with a special rod in three stages and 25 times per stage. The samples were kept in the molds at 24°C – the laboratory temperature, for 24 h and, then, placed in a water tank for 28 days, for hardening.

4. Radiation test

The samples were removed from the water after 28 days and transferred to Nuclear Physics Laboratory, University of UMA, to be

Tablica 6 / Table 6

SKŁAD MIESZANEK Z KTÓRYCH PRZYGOTOWANO PRÓBKİ

MIX DESIGN OF THE PREPARED SAMPLES

No. Nr	Mix Designation Nazwa składu mieszanki	Cement, kg/m ³	Water Woda, kg/m ³	Normal aggregate Kruszywo typowe, kg/m ³	Ferrophosphorus aggregate Kruszywo żelazofosforowe, kg/m ³	Steel powder Proszek stalowy, kg/m ³	Nanosilica powder Proszek nanokrzemionkowy, kg/m ³	Super plasticizer Superplastyfikator kg/m ³
1	Ph0Fe0Na0	370	135	1573	0	0	0	0
2	Ph0Fe0Na5	352	135	1568	0	0	19	0
3	Ph0Fe0Na8	352	143	1538	0	0	31	0
4	Ph0Fe10Na0	370	135	1536	0	37	0	0
5	Ph0Fe10Na5	352	135	1533	0	35.2	19	0
6	Ph0Fe10Na8	352	143	1503	0	35.5	31	0
7	Ph0Fe20Na0	370	135	1499	0	74	0	0
8	Ph0Fe20Na5	352	135	1498	0	70.4	19	0
9	Ph0Fe20Na8	352	143	1468	0	70.4	31	0
10	Ph0Fe30Na0	370	135	1462	0	111	0	0
11	Ph0Fe30Na5	352	135	1462	0	105.6	19	0
12	Ph0Fe30Na8	352	143	1432	0	105.6	31	0
13	Ph25Fe0Na0	370	158	1178	797	0	0	0
14	Ph25Fe0Na5	352	158	1176	795	0	19	0
15	Ph25Fe0Na8	368	163	1134	773	0	32	3.2
16	Ph25Fe10Na0	370	158	1150	788	37	0	0
17	Ph25Fe10Na5	352	158	1150	786	35.2	19	0
18	Ph25Fe10Na8	368	163	1115	764	36.8	32	3.2
19	Ph25Fe20Na0	370	158	1123	779	74	0	0
20	Ph25Fe20Na5	352	158	1123	777	70.4	19	0
21	Ph25Fe20Na8	368	163	1088	755	73.6	32	3.2
22	Ph25Fe30Na0	370	158	1095	769	111	0	0
23	Ph25Fe30Na5	352	158	1097	768	105.6	19	0
24	Ph25Fe30Na8	368	163	1060	746	110.4	32	3.2
25	Ph50Fe0Na0	370	181	785	1593	0	0	0
26	Ph50Fe0Na5	352	181	782	1588	0	19	0
27	Ph50Fe0Na8	368	185	761	1546	0	32	3.2
28	Ph50Fe10Na0	370	181	767	1575	37	0	0
29	Ph50Fe10Na5	352	181	764	1570	35.2	19	0
30	Ph50Fe10Na8	368	185	743	1528	36.8	32	3.2
31	Ph50Fe20Na0	370	181	748	1556	74	0	0
32	Ph50Fe20Na5	352	181	747	1553	70.4	19	0
33	Ph50Fe20Na8	368	185	724	1509	73.6	32	3.2
34	Ph50Fe30Na0	370	181	730	1538	111	0	0
35	Ph50Fe30Na5	352	181	729	1535	105.6	19	0
36	Ph50Fe30Na8	368	185	706	1491	110.4	32	3.2
37	Ph75Fe0Na0	370	204	392	2388	0	0	0
38	Ph75Fe0Na5	380	207	381	2322	0	20	3.2
39	Ph75Fe0Na8	368	207	381	2318	0	32	3.2
40	Ph75Fe10Na0	370	204	383	2360	37	0	0
41	Ph75Fe10Na5	380	207	372	2294	38	20	3.2
42	Ph75Fe10Na8	368	207	372	2289	36.8	32	3.2
43	Ph75Fe20Na0	370	204	383	2360	74	0	0
44	Ph75Fe20Na5	380	207	372	2294	76	20	3.2
45	Ph75Fe20Na8	368	207	372	2289	73.6	32	3.2
46	Ph75Fe30Na0	370	204	364	2305	111	0	0
47	Ph75Fe30Na5	380	207	353	2237	114	20	3.2
48	Ph75Fe30Na8	368	207	353	2232	110.4	32	3.2
49	Ph100Fe0Na0	370	228	0	3182	0	0	0
50	Ph100Fe0Na5	380	230	0	3095	0	20	3.2
51	Ph100Fe0Na8	368	230	0	3090	0	32	3.2
52	Ph100Fe10Na0	370	228	0	3145	37	0	0
53	Ph100Fe10Na5	380	230	0	3057	38	20	3.2
54	Ph100Fe10Na8	368	230	0	3053	36.8	32	3.2
55	Ph100Fe20Na0	370	228	0	3108	74	0	0
56	Ph100Fe20Na5	380	230	0	3019	76	20	3.2
57	Ph100Fe20Na8	368	230	0	3016	73.6	32	3.2
58	Ph100Fe30Na0	370	228	0	3071	111	0	0
59	Ph100Fe30Na5	380	230	0	2981	114	20	3.2
60	Ph100Fe30Na8	368	230	0	2980	110.4	32	3.2

wania, emitowanego ze źródła i na próbki. Efekty tła były mierzone przy braku źródła i próbki, a następnie promieniowanie emitowane ze źródła. Było ono mierzone bez próbek sześciennych. Każde badanie było powtarzane dwukrotnie, w celu zmniejszenia błędu. Każdy etap badania trwał 10 min. Szybkość zliczania promieniowania tła, była odejmowana od szybkości zliczania promieniowania źródła i próbki, a następnie obliczano tylko promieniowanie.

W celu pomiaru promieniowania przechodzącego przez próbkę, próbka betonu została umieszczona przed źródłem cezu-137. Promienie emitowane ze źródła, po przejściu przez kolimator, wchodziło równoległe do próbki i część z nich traciła swoją energię, w zależności od materiałów użytych w próbce, a część wchodziła do detektora, przechodząc przez próbkę. Wszystkie próbki poddano naświetlaniu, dwukrotnie przez 10 min, w celu zmniejszenia błędu pomiarowego, a wyniki zarejestrowano poprzez uśrednienie danych, z tych dwóch etapów. W tym doświadczeniu stosowano 3-calowy detektor NaI (TI), ze względu na jego dużą wydajność. Jego średnica i wysokość wynosiły 3 cale (10). Pierwszy pik po lewej stronie, reprezentuje promienie wpadające do próbki, a drugi pik po prawej stronie, reprezentuje promienie wychodzące z próbki. Drugi pik był krótszy niż pierwszy, w próbkach o mniejszym udziale typowego piasku. Po każdym etapie pomiarowym, wszystkie dane były zapisywane wraz z numerem próbki, aby uzyskać liniowy współczynnik tłumienia poprzez analizę danych, przy użyciu następującego równania. W związku z tym liniowy współczynnik tłumienia odnoszący się do każdej próbki obliczono w następujący sposób (14):

$$N = N_0 e^{-\mu x} \Rightarrow \mu = \frac{1}{x} \ln \frac{N_0}{N}$$

gdzie: N jest kolejną liczbą dla każdej próbki betonu, N_0 jest liczbą źródła, bez udziału betonu, poprzez odjęcie od niej liczby zliczeń tła, μ jest liniowym współczynnikiem tłumienia betonu w cm^{-1} , a X jest grubością betonu w cm.

5. Analiza wyników wyznaczania liniowego współczynnika tłumienia na podstawie wyodrębnionych wykresów, przy stosowaniu nano-krzemionki

Badanie wykresów próbek wykonanych, bez stosowania żelazofosforu i proszku stalowego, wykazało wzrost liniowego współczynnika tłumienia w mieszaninie z 5% dodatkiem nano-krzemionki. Liniowy współczynnik tłumienia wzrastał w mieszaninie z 5% dodatkiem nano-krzemionki po dodaniu 10% i 30% proszku stalowego, przy braku żelazofosforu, w porównaniu do mieszaniny bez dodatku żelazofosforu, stali i proszku nano-krzemionki. Wyniki badań wykazały, że liniowy współczynnik tłumienia wzrasta wraz ze wzrostem



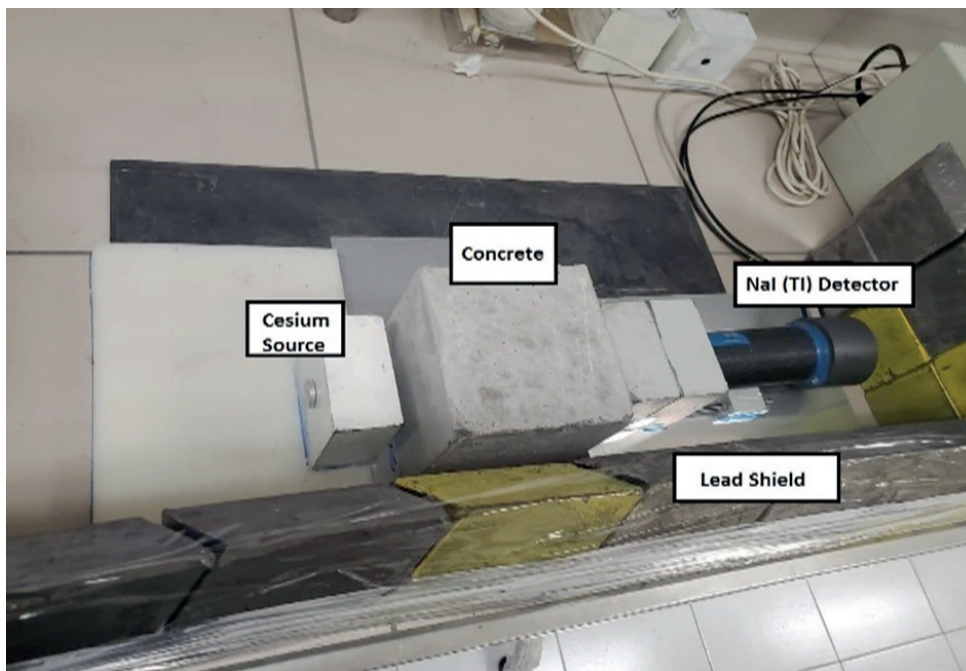
Rys. 3. Źródło cezu-137, emitujące promienie gamma

Fig. 3. Cesium-137 source emitting gamma rays

exposed to gamma radiation, emitted from cesium-137 source. In the following, the process of radiation test is described. As shown in Fig. 3, cesium-137 was the gamma radiation source which radiated at the distance of 1 m and at dose rate of 7.115 mSv/h.

This source had activities of 5 μCi and 3.7 MBq and an energy of 662 keV. The point source was located at a distance of 1 cm from the center of the sample width. Lead shields were placed on the sides and under and above the source to provide protection [Fig. 4] (13). The collimator height of the source and detector was adjusted before the samples were exposed to gamma radiation in the laboratory environment, which could affect the intensity of the rays emitted from the source and sample. Background effects were measured in the absence of the source and sample and then the radiation emitted from the source was measured without the presence of the cubic sample. Each test was repeated twice to reduce the error. Each stage of the test lasted for 10 min. The background radiation count rate was subtracted from the source and sample count rate and the net radiation was calculated.

To measure the radiation passing through the sample, the concrete sample was placed in front of the cesium-137 source. The rays emitting from the source entered the sample in parallel after passing through the collimator and some of them lost their energy, depending on the materials used in the sample, while some entered the detector by passing through the sample. All the samples were exposed to radiation twice for 10 min, in order to reduce the experimental error and the results were recorded by averaging the data of these two stages. The 3-inch NaI [TI] 3-inch detector was used



Rys. 4. Umieszczenie detektora za próbką i odbiór promieni gamma, przechodzących przez beton

Fig. 4. Placing the detector behind the sample and receiving gamma rays passing through the concrete

dotąd proszku stalowego, tak że, największy liniowy współczynnik tłumienia uzyskano po dodaniu 30% proszku stalowego, do mieszaniny z 5% dodatkiem nano-krzemionki, bez żelazofosforu. Dlatego też zwiększenie dodatku stali oraz zastosowanie 5% nano-krzemionki, zwiększyło liniowy współczynnik tłumienia.

Po dodaniu do próbek żelazofosforu liniowy współczynnik tłumienia znacznie wzrósł, podobnie jak po dodaniu proszku stalowego. Natomiast zwiększanie zawartości nano-krzemionki nie miało wpływu na zwiększenie liniowego współczynnika tłumienia i wykazywało inne zachowanie.

Porównując trzy próbki wykonane z dodatkiem 25% żelazofosforu przy 10% i 20% zawartości proszku stalowego, 50% żelazofosforu przy 10% i 20% zawartości proszku stalowego oraz 75% żelazofosforu przy 10% i 30% zawartości proszku stalowego, wykazano, że liniowy współczynnik tłumienia miał największą wartość, gdy nie dodano nano-krzemionki. Liniowy współczynnik tłumienia zmniejszał się jednak wraz ze wzrostem nano-krzemionki. Z tego względu najbardziej efektywnymi materiałami, w zwiększaniu liniowego współczynnika tłumienia, okazały się odpowiednio: żelazofosfor, proszek stalowy i nano-krzemionka.

Wyniki analiz wykazały, że nano-krzemionka nie była ważnym czynnikiem, wpływającym na zwiększenie liniowego współczynnika tłumienia. Wpływ nano-krzemionki i przyczynę jej dwójnego zachowania, co pokazano na diagramach, można ocenić biorąc pod uwagę reakcje chemiczne cementu. Gdy zawartość wody była wystarczająca do hydratacji cementu w betonie i reakcji nano-krzemionki, nano-krzemionka wypełniała pory między ziarnami kruszywa, powiększała gęstość, a w końcu zwiększała liniowy współczynnik tłumienia. Jednak przy zaburzeniu równowagi pomiędzy ilością wody potrzebnej do hydratacji a zawartością

in this test due to its high efficiency, both in diameter and height (10). The first peak on the left side represents the incoming rays and the second peak on the right side represents the output rays from the sample. The second peak was shorter than the first peak in the samples, consisting of the lower percentage of typical sand. After each step, all the data were stored with the sample number, to obtain the linear attenuation coefficient by analyzing the data, using the following equation. Therefore, the linear attenuation coefficient related to each sample was calculated as follows (14):

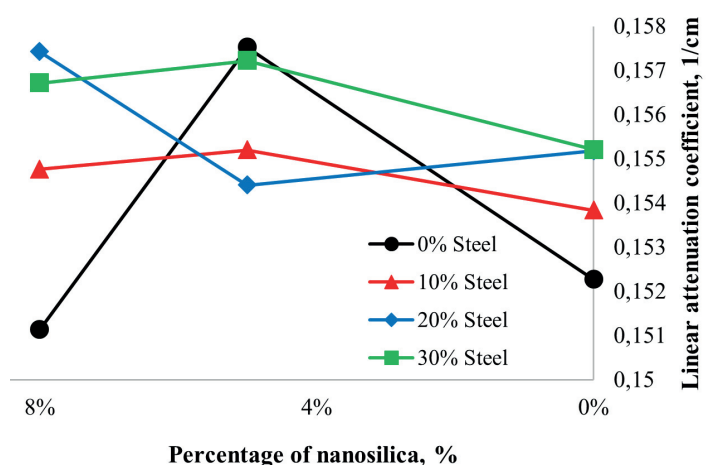
$$N = N_0 e^{-\mu x} \Rightarrow \mu = \frac{1}{x} \ln \frac{N_0}{N}$$

where: N is the net count of each concrete sample, N_0 is the net count of the source, without the presence

of concrete by subtracting the background count rate from it, μ is the linear attenuation coefficient of concrete in cm^{-1} , and X is the concrete thickness in cm.

5. Analysis of the results of linear attenuation coefficient, based on the extracted diagrams in terms of nanosilica

Examining the diagrams of the samples made without using ferro-phosphorus and steel powder showed that the linear attenuation coefficient increased in the compound, with 5% nanosilica. The linear attenuation coefficient increased in the compound with 5% nanosilica when 10% and 30% steel powder were added in the



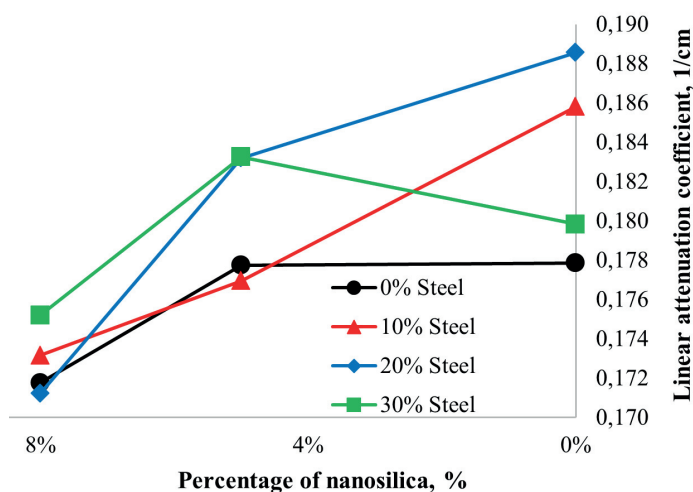
Rys. 6. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości nanokrzemionki bez żelazofosforu i z różnymi dodatkami stali

Fig. 6. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of nanosilica without ferro-phosphorus and different percentages of steel

nano-krzemionki, zwiększanie jej zawartości powodowało nadmier-
ną absorpcję wody i gorszą hydratację cementu, a w konsekwencji
obniżenie liniowego współczynnika tłumienia.

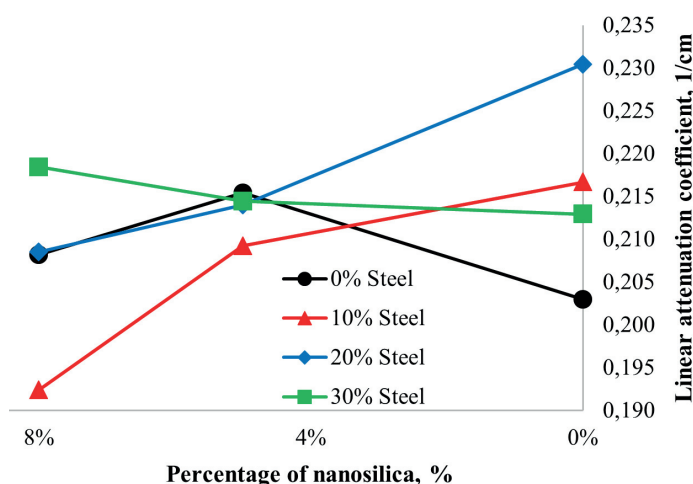
6. Analiza wyników wyznaczania liniowego współczynnika tłumienia na podstawie wyodrębnionych wykresów z zastosowaniem stali

Badając wykresy próbek wykonanych ze stali, bez użycia nano-
krzemionki i żelazofosforu, stwierdzono, że liniowy współczynnik
tłumienia wzrastał wraz ze wzrostem dodatku stali do 30%. Po
dodaniu nanokrzemionki do próbek, przy braku żelazofosforu,
nano-krzemionka miała różny wpływ, w różnych odstępach czasu,
zmniejszając liniowy współczynnik tłumienia w niektórych prób-



Rys. 7. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości nanokrzemionki, z 25% dodatkiem żelazofosforu i różnymi dodatkami stali

Fig. 7. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of nanosilica with 25% ferrophosphorus and different percentages of steel



Rys. 8. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości nanokrzemionki, z 50% dodatkiem żelazofosforu i różnymi dodatkami stali

Fig. 8. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of nanosilica with 50% ferrophosphorus and different percentages of steel

absence of ferrophosphorus, compared to the compound without ferrophosphorus, steel, and nanosilica powder. The results indicated that the linear attenuation coefficient increased mainly with increasing steel powder consumption, such that the highest linear attenuation coefficient was obtained after adding 30% steel powder to the compound with 5% nanosilica, without ferrophosphorus. Therefore, increasing the steel addition and using 5% nanosilica increased the linear attenuation coefficient.

By adding ferrophosphorus to the samples, the linear attenuation coefficient increased significantly, just as the steel powder was added. However, increasing the content of nanosilica had no acceptable effect on increasing the linear attenuation coefficient and showed a different behavior.

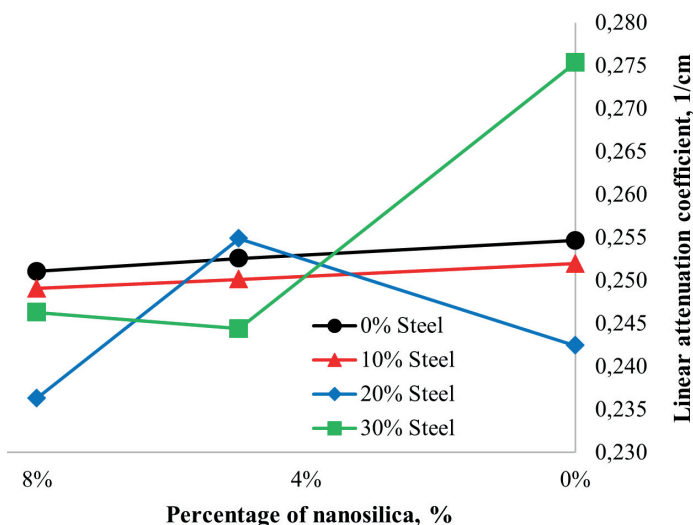
Comparing the three samples made of 25% ferrophosphorus and 10% and 20% steel powder, 50% ferrophosphorus and 10% and 20% steel powder, and 75% ferrophosphorus and 10% and 30% steel powder showed that the linear attenuation coefficient had the highest value when no nanosilica was used. However, the linear attenuation coefficient decreased with increasing nanosilica consumption. Therefore, the most effective materials in increasing the linear attenuation coefficient were ferrophosphorus, steel powder, and nanosilica, respectively.

The results of the analyses revealed that nanosilica was not a significant factor in increasing the linear attenuation coefficient. The effect of nanosilica and the cause of its dual behavior in diagrams can be evaluated considering the chemical reactions of cement. When existing water was sufficient for cement hydration in concrete and nanosilica reaction, nanosilica filled the pores among the aggregates with its expansion function, created a higher density, and finally, increased the linear attenuation coefficient. However, when the balance between the content of water required for hydration and the content of nanosilica was disturbed, increasing nanosilica caused excessive water absorption and poor performance of cement hydration and, consequently, reduced the linear attenuation coefficient.

6. Analyzing results of linear attenuation coefficient based on the extracted diagrams in terms of steel

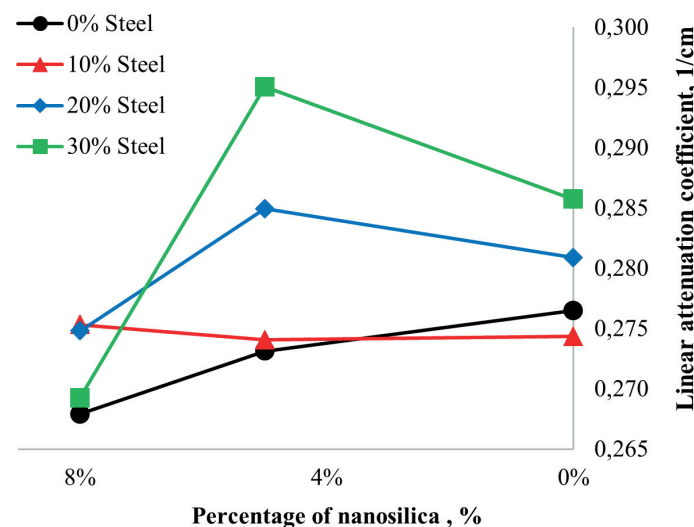
Examination the diagrams of the samples made with steel, without using nanosilica and ferrophosphorus, showed the linear attenuation coefficient increased with increasing steel addition from zero to 30%. By addition of nanosilica to the samples, in the absence of ferrophosphorus, nanosilica behaved differently at different intervals. Thus, it reduced the linear attenuation coefficient in some samples, while increasing this coefficient in others, the reason for which can be attributed to the chemical reaction of cement, the adsorption of water by nanosilica, and the amount of existing water for cement hydration.

The linear attenuation coefficients increased with increasing steel addition in the content in the sample of 25-100% ferrophosphorus,



Rys. 9. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości nanokrzemionki, z 75% dodatkiem żelazofosforu i różnymi dodatkami stali

Fig. 9. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of nanosilica with 75% ferrophosphorus and different percentages of steel

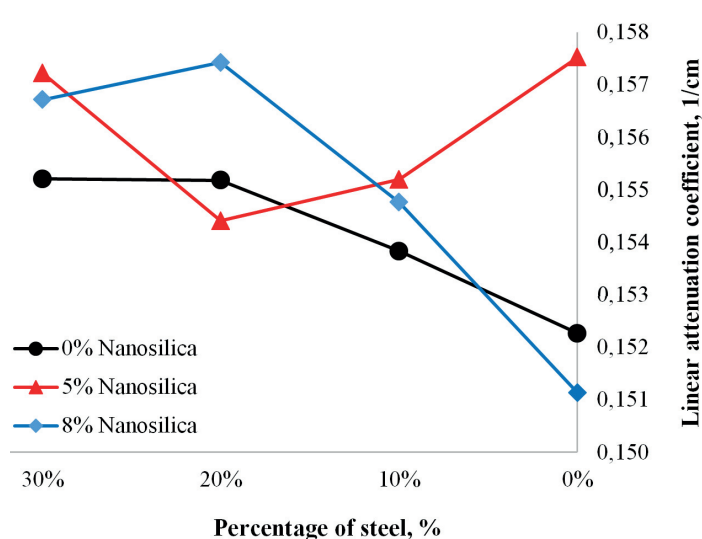


Rys. 10. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości nanokrzemionki, z 100% dodatkiem żelazofosforu i różnymi dodatkami stali

Fig. 10. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of nanosilica, with 100% ferrophosphorus and different percentages of steel

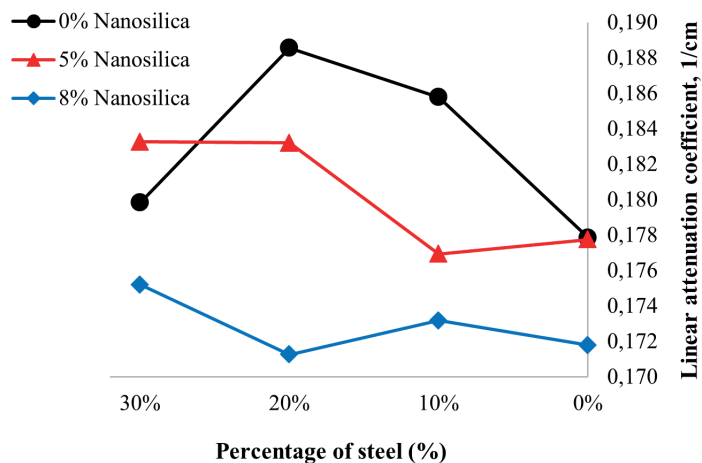
kach, podczas gdy w innych zwiększała ten współczynnik, czego przyczyną może być hydratacja cementu, adsorpcja wody przez nano-krzemionkę oraz zawartość wody do hydratacji cementu.

Współczynniki tłumienia liniowego wzrastały wraz ze wzrostem zużycia stali przy dodatku 25-100% żelazofosforu, co wskazuje na duży wpływ stali, po żelazofosforze, na wzrost współczynnika tłumienia liniowego. Jednakże nano-krzemionka ponownie zachowywała się inaczej po dodaniu do próbek, zawierających żelazofosfor w różnych proporcjach. Na przykład, porównanie czterech próbek wykonanych z 25%, 50%, 75% i 100% żelazofosforu i 8% nano-krzemionki, wykazało spadek liniowych współczynników tłumienia, w porównaniu do próbek z 5% dodatkiem nano-



Rys. 11. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonego dodatku stali, bez żelazofosforu i z różnymi dodatkami nanokrzemionki

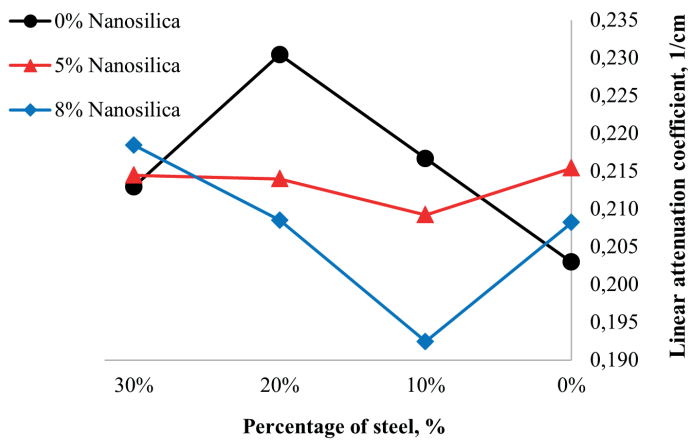
Fig. 11. Linear attenuation coefficient as the function of increased content of steel without ferrophosphorus and with different nanosilica percentages



Rys. 12. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości stali, z 25% dodatkiem żelazofosforu i różnymi dodatkami nanokrzemionki

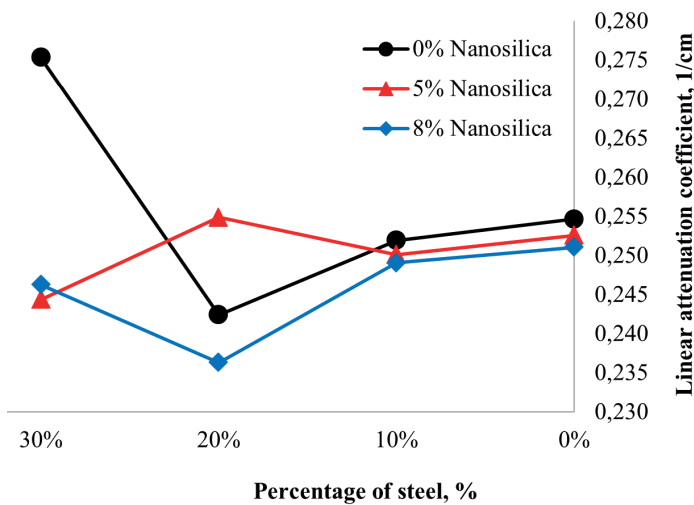
Fig. 12. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of steel, with 25% ferrophosphorus and different nanosilica percentages

indicating the significant effect of steel, after ferrophosphorus on increasing the linear attenuation coefficient. However, the nanosilica again behaved differently when it was added to the samples simultaneously with the ferrophosphorus at different ratios. For example, comparing the four samples made of 25%, 50%, 75% and 100% ferrophosphorus and 8% nanosilica showed a decrease in linear attenuation coefficients, compared to the samples with 5% nanosilica or without nanosilica. The linear attenuation coefficient was also lower in most of the samples that contained 5% nanosilica than those that did not have nanosilica. However, the results of the addition of ferrophosphorus and nanosilica along with steel in the samples showed that using 30% steel powder in most of the samples showed that they had a greater effect on increasing the linear compression coefficient.



Rys. 13. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości stali, z 50% dodatkiem żelazofosforu i różnymi dodatkami nanokrzemionki

Fig. 13. Linear attenuation coefficient as the function of increased content of steel, with 50% ferrophosphorus and different nanosilica percentages

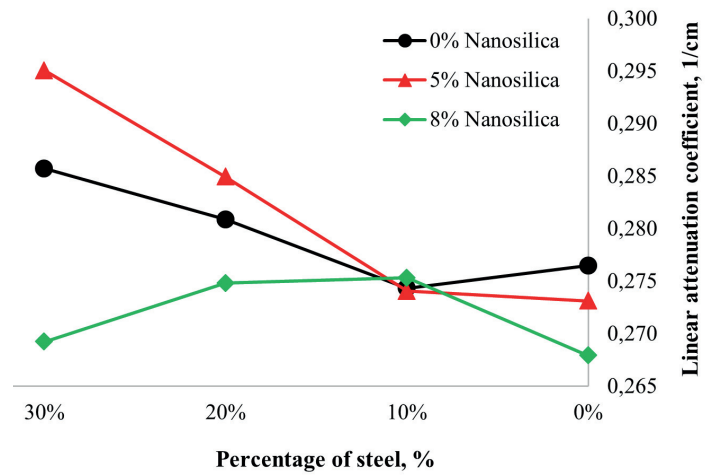


Rys. 14. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości stali, z 75% dodatkiem żelazofosforu i różnymi dodatkami nanokrzemionki

Fig. 14. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of steel, with 75% ferrophosphorus and different nanosilica percentages

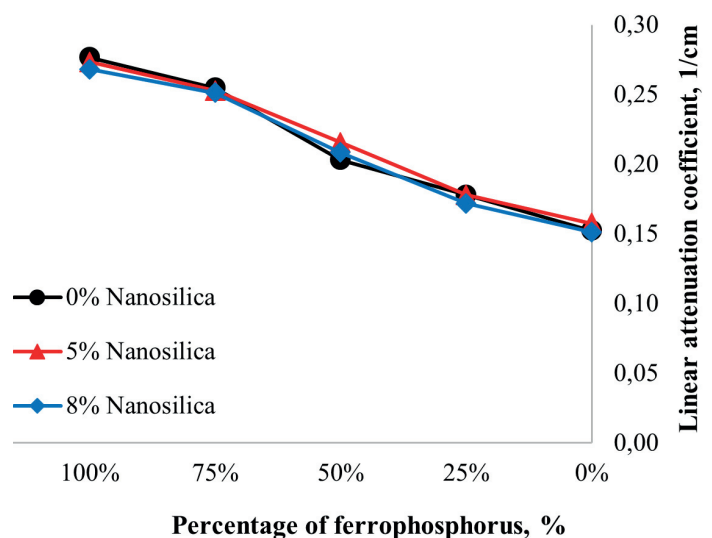
krzemionki lub bez nano-krzemionki. Liniowy współczynnik tłumienia był również mniejszy w większości próbek, w których zastosowano 5% dodatek nano-krzemionki, niż w tych, w których nie dodano nano-krzemionki. Natomiast wyniki badań dodatku żelazofosforu i nano-krzemionki, wraz ze stalą w próbkach wykazały, że zastosowanie 30% dodatku proszku stalowego, w większości próbek miało większy wpływ na zwiększenie liniowego współczynnika ściskania.

Można stwierdzić, że, po żelazofosforze, największy wpływ na zwiększenie liniowego współczynnika tłumienia miał proszek stalowy, czego przyczyną może być ciężar właściwy i właściwości wypełniające proszku stalowego, które zwiększały liniowy współczynnik tłumienia, dzięki zwiększeniu gęstości betonu. Najlepsze wyniki uzyskano stosując 30% dodatek proszku stalowego.



Rys. 15. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększonej zawartości stali, z 100% dodatkiem żelazofosforu i różnymi dodatkami nanokrzemionki

Fig. 15. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of steel with 100% ferrophosphorus and different nanosilica percentages



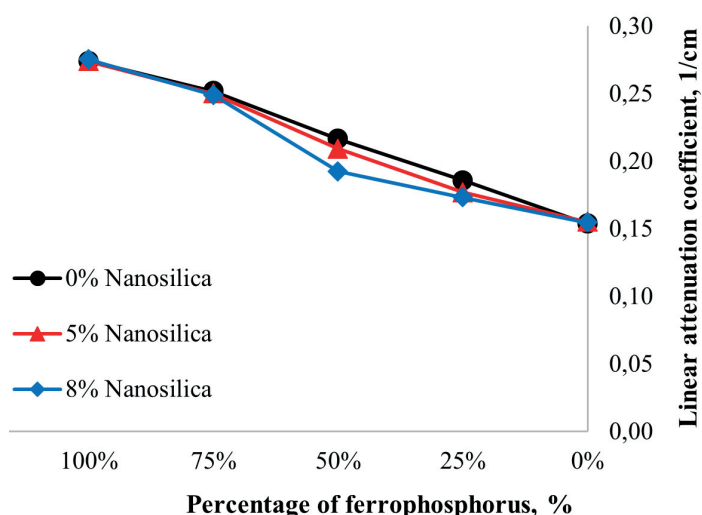
Rys. 16. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększenia zawartości żelazofosforu, bez dodatku stali, z różnymi dodatkami nanokrzemionki

Fig. 16. Linear attenuation coefficient as a function of the increased content of ferrophosphorus, without using steel and different nanosilica percentages

It can be concluded that after ferrophosphorus, steel powder had the greatest effect on increasing the linear attenuation coefficient. This can be attributed to the specific gravity and filling properties of steel powder, which increased the linear attenuation coefficient by increasing the concrete density. Using 30% steel powder achieved the best results.

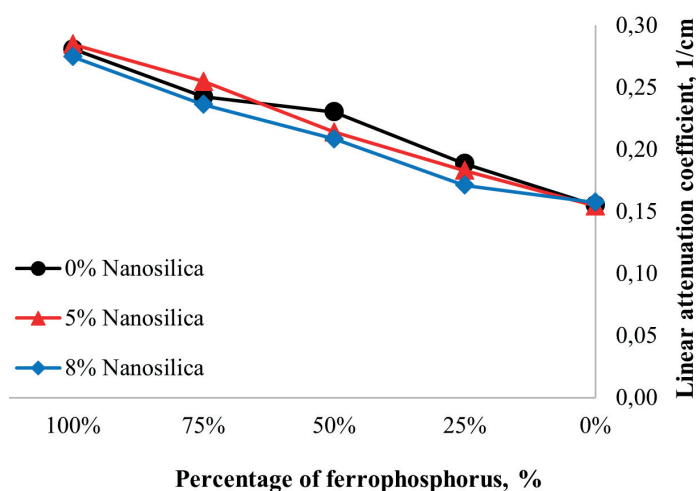
7. Analysis of the results of linear attenuation coefficient based on the extracted diagrams with the ferrophosphorus

Examining the diagrams of the samples made of ferrophosphorus, without using steel and nanosilica, showed the increase in



Rys. 17. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od wzrostu zawartości żelazofosforu, z 10% dodatkiem stali i różnymi dodatkami nanokrzemionki

Fig. 17. Linear attenuation coefficient as a function of increased content of ferrophosphorus, with 10% steel and different nanosilica percentages

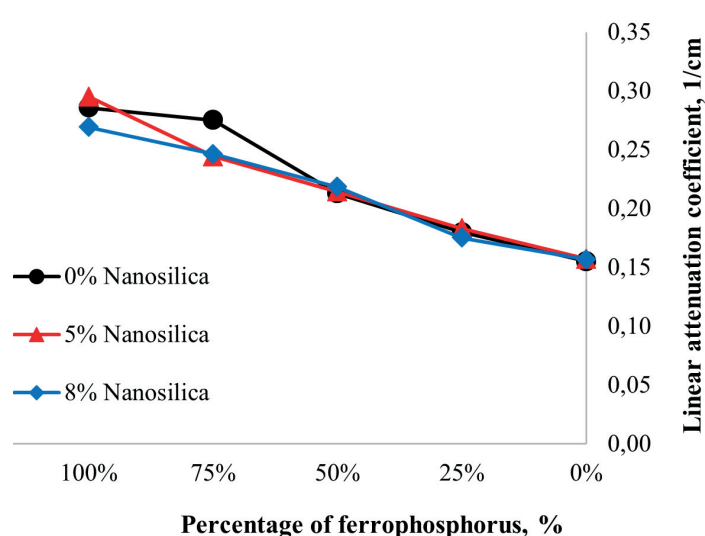


Rys. 18. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększenia dodatku żelazofosforu, z 20% zawartością stali i różnymi dodatkami nanokrzemionki

Fig. 18. Linear attenuation coefficient as the function of increased content of ferrophosphorus, with 20% steel and different nanosilica additions

7. Analiza wyników wyznaczania liniowego współczynnika tłumienia, na podstawie wyodrębnionych wykresów, w przypadku żelazofosforu

Badanie wykresów próbek wykonanych z żelazofosforu, bez stosowania stali i nano-krzemionki, wykazało, że liniowy współczynnik tłumienia wzrastał, wraz ze wzrostem zawartości żelazofosforu. Tendencja ta utrzymywała się we wszystkich próbkach i nie stwierdzono zmian w procesie narastania liniowego współczynnika tłumienia, przy różnych dodatkach proszku stalowego i nano-krzemionki. Wskazuje to na duży wpływ żelazofosforu, w porównaniu z proszkiem stalowym i nano-krzemionką, na zwiększenie liniowego współczynnika tłumienia.



Rys. 19. Liniowy współczynnik tłumienia w zależności od zwiększenia dodatku żelazofosforu, z 30% zawartością stali i różnymi dodatkami nanokrzemionki

Fig. 19. Linear attenuation coefficient as the function of increased content of ferrophosphorus, with 30% steel and different nanosilica content

the linear attenuation coefficient with increasing ferrophosphorus addition. This trend continued in all of the samples, so no change was observed in the increasing process of the linear attenuation coefficient in the content of steel and nanosilica at different percentages, indicating the significant effect of ferrophosphorus, compared to that of steel powder and nanosilica, on increasing the linear attenuation coefficient.

In general, ferrophosphorus was among the most effective materials, in increasing the linear attenuation coefficient, the reason for which can be attributed to its high specific gravity and radiation absorption property.

8. Examination of concrete density based on different contents of ferrophosphorus, steel powder and nanosilica

After the samples were removed from the water and their surface was dried at the ambient temperature, they were weighed and their dimensions were measured to determine their specific gravity. According to the results presented in Table 7, nanosilica and steel powder had an insignificant effect on increasing the concrete density compared to ferrophosphorus, i.e., ferrophosphorus had the highest effect on increasing the concrete density. Fig. 20 show the diagram of density as a function of ferrophosphorus content.

According to Fig. 20 and Table 7, ferrophosphorus had the highest effect on increasing concrete density. The results showed that the concrete density increased with constant slope with increasing ferrophosphorus addition from up to 100%. Regarding the insignificant effects of steel and nanosilica powder, it was found that using 20% steel powder was effective in increasing concrete density, in most samples. Nanosilica showed dual behavior in samples with

Tablica 7 / Table 7

WYNIKI POMIARÓW GĘSTOŚCI BETONU

CONCRETE DENSITY MEASUREMENT RESULTS

Sample designation Nazwa próbki	Mass Masa, kg	Phosphorous Fosfor	Steel crumb Okruchy stali	Nanosilica Nanokrzemionka	Density Gęstość, kg/m ³
Ph0Fe0Na0	7.720	0%	0%	0%	2292
Ph0Fe0Na5	7.783	0%	0%	5%	2311
Ph0Fe0Na8	7.743	0%	0%	8%	2299
Ph0Fe10Na0	7.644	0%	10%	0%	2269
Ph0Fe10Na5	7.895	0%	10%	5%	2344
Ph0Fe10Na8	7.956	0%	10%	8%	2362
Ph0Fe20Na0	7.747	0%	20%	0%	2300
Ph0Fe20Na5	7.815	0%	20%	5%	2320
Ph0Fe20Na8	7.892	0%	20%	8%	2343
Ph0Fe30Na0	7.867	0%	30%	0%	2336
Ph0Fe30Na5	7.978	0%	30%	5%	2369
Ph0Fe30Na8	7.947	0%	30%	8%	2359
Ph25Fe0Na0	9.359	25%	0%	0%	2779
Ph25Fe0Na5	9.407	25%	0%	5%	2793
Ph25Fe0Na8	9.400	25%	0%	8%	2791
Ph25Fe10Na0	9.650	25%	10%	0%	2865
Ph25Fe10Na5	9.544	25%	10%	5%	2834
Ph25Fe10Na8	9.52	25%	10%	8%	2826
Ph25Fe20Na0	9.762	25%	20%	0%	2898
Ph25Fe20Na5	9.665	25%	20%	5%	2869
Ph25Fe20Na8	9.321	25%	20%	8%	2767
Ph25Fe30Na0	9.305	25%	30%	0%	2763
Ph25Fe30Na5	9.585	25%	30%	5%	2846
Ph25Fe30Na8	9.397	25%	30%	8%	2790
Ph50Fe0Na0	11.186	50%	0%	0%	3321
Ph50Fe0Na5	11.207	50%	0%	5%	3327
Ph50Fe0Na8	11.289	50%	0%	8%	3352
Ph50Fe10Na0	11.183	50%	10%	0%	3320
Ph50Fe10Na5	11.168	50%	10%	5%	3316
Ph50Fe10Na8	10.949	50%	10%	8%	3251
Ph50Fe20Na0	11.223	50%	20%	0%	3332
Ph50Fe20Na5	11.298	50%	20%	5%	3354
Ph50Fe20Na8	11.344	50%	20%	8%	3368
Ph50Fe30Na0	11.238	50%	30%	0%	3336
Ph50Fe30Na5	11.314	50%	30%	5%	3359
Ph50Fe30Na8	11.407	50%	30%	8%	3387
Ph75Fe0Na0	12.949	75%	0%	0%	3844
Ph75Fe0Na5	12.849	75%	0%	5%	3815
Ph75Fe0Na8	13.074	75%	0%	8%	3882
Ph75Fe10Na0	12.890	75%	10%	0%	3827
Ph75Fe10Na5	13.107	75%	10%	5%	3891
Ph75Fe10Na8	12.886	75%	10%	8%	3826
Ph75Fe20Na0	13.345	75%	20%	0%	3962
Ph75Fe20Na5	12.963	75%	20%	5%	3849
Ph75Fe20Na8	13.050	75%	20%	8%	3874
Ph75Fe30Na0	12.962	75%	30%	0%	3848
Ph75Fe30Na5	12.899	75%	30%	5%	3830
Ph75Fe30Na8	12.797	75%	30%	8%	3799

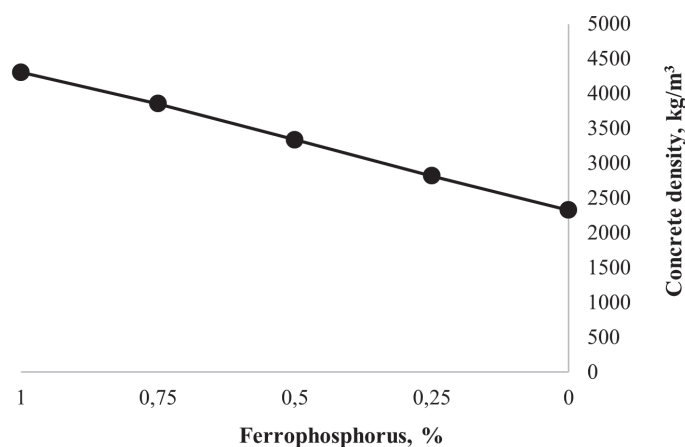
Ph100Fe0Na0	14.300	100%	0%	0%	4246
Ph100Fe0Na5	14.338	100%	0%	5%	4257
Ph100Fe0Na8	14.298	100%	0%	8%	4245
Ph100Fe10Na0	14.453	100%	10%	0%	4291
Ph100Fe10Na5	14.435	100%	10%	5%	4286
Ph100Fe10Na8	14.538	100%	10%	8%	4316
Ph100Fe20Na0	14.802	100%	20%	0%	4395
Ph100Fe20Na5	14.709	100%	20%	5%	4367
Ph100Fe20Na8	14.494	100%	20%	8%	4303
Ph100Fe30Na0	14.598	100%	30%	0%	4334
Ph100Fe30Na5	14.527	100%	30%	5%	4313
Ph100Fe30Na8	14.478	100%	30%	8%	4298

Ogólnie rzecz biorąc, żelazofosfor był jednym z najbardziej efektywnych materiałów w zwiększaniu liniowego współczynnika tłumienia, co można przypisać jego dużemu ciężarowi właściwemu i właściwościom absorpcyjnym promieniowania.

8. Analiza gęstości betonu w oparciu o różne zawartości żelazofosforu, proszku stalowego i nano-krzemionki

Po wyjęciu próbek z wody i wysuszeniu ich powierzchni w temperaturze otoczenia, zważono je i zmierzono ich wymiary, w celu określenia ciężaru właściwego. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w tabeli 7, nanokrzemionka i proszek stalowy nie miały dużego wpływu na zwiększenie gęstości betonu, w porównaniu z żelazofosforem, który miał największy wpływ na gęstość betonu. Na rys. 20 przedstawiono wykres gęstości w przeliczeniu na żelazofosfor.

Z rys. 20 i tab. 7 wynika, że największy wpływ na zwiększenie gęstości betonu miał żelazofosfor. Wyniki badań wykazały, że gęstość betonu wzrastała proporcjonalnie wraz ze wzrostem dodatku żelazofosforu, do 100%. W odniesieniu do nieistotnego wpływu proszku stalowego i nano-krzemionki stwierdzono, że zastosowanie 20% dodatku proszku stalowego, znacznie zwiększyło gęstość betonu, w większości próbek. Nano-krzemionka wykazywała dwojakie zachowanie w próbkach o różnym składzie – zmniejszała gęstość betonu w niektórych próbkach, podczas gdy zwiększała gęstość w innych, czego przyczynę można ocenić biorąc pod uwagę hydratację cementu. Gdy faza ciekła w zaczynie była wystarczająca do hydratacji cementu w betonie i reakcji nano-krzemionki, nano-krzemionka wypełniała pory między ziarnami kruszywa, zwiększając gęstość oraz liniowy współczynnik tłumienia. Jednak przy zaburzeniu równowagi pomiędzy ilością wody potrzebnej do hydratacji, a zawartością nano-krzemionki, zwiększanie jej zawartości powodowało nadmierną absorpcję wody i wolniejszą hydratację cementu, a w konsekwencji zmniejszenie liniowego współczynnika tłumienia. Analizując wyniki badań liniowego współczynnika tłumienia i gęstości betonu stwierdzono, że liniowy współczynnik tłumienia był bezpośrednio skorelowany z gęstością betonu, a więc liniowy współczynnik tłumienia wzrastał wraz ze wzrostem gęstości betonu. Najmniejsza gęstość – 2269 kg/m³, dotyczyła próbki wykonanej w 100% z kruszywa typowego, bez



Rys. 20. Wykres zmian gęstości betonu w zależności od zawartości procentowej żelazofosforu

Fig. 20. Diagram of concrete density changes as the function of the percentage of ferrophosphorus added to the samples

different compositions, so it decreased the density of concrete in some samples, while increasing the density in some others, the reason for which can be evaluated considering the chemical reactions of cement. When existing water was sufficient for cement hydration in concrete and nanosilica reaction, nanosilica filled the pores among the aggregates with its expansion function, created a higher density, and finally, increased the linear attenuation coefficient. However, when the balance between the content of water required for hydration and the content of nanosilica was disturbed, increasing nanosilica caused excessive water absorption and poor performance of cement hydration and, consequently reduced the linear attenuation coefficient. Analyzing the results of the linear attenuation coefficient and concrete density, indicated that the linear attenuation coefficient was directly correlated with concrete density. Thus, the linear attenuation coefficient increased with increasing the concrete density. The lowest density of 2269 kg/m³ was related to the sample made of 100% typical aggregate, 0% ferrophosphorus, 10% steel powder and 0% nanosilica and the highest density was related to the sample made of 100% ferrophosphorus, 20% steel powder and 0% nanosilica, indicating the effect of ferrophosphorus and 20% steel powder on increasing the concrete density, respectively.

żelazofosforu, 10% proszku stalowego i bez nano-krzemionki. Największa gęstość dotyczyła próbki wykonanej w 100% z żelazofosforu, 20% proszku stalowego i bez nano-krzemionki, co wskazuje na wpływ żelazofosforu i 20% proszku stalowego, na zwiększenie gęstości betonu.

9. Wnioski

Gęstość betonu i liniowy współczynnik tłumienia wyraźnie wzrosły wraz ze wzrostem zawartości kruszywa żelazofosforowego. Kruszywo żelazofosforowe było najbardziej efektywnym czynnikiem zwiększającym gęstość betonu i liniowy współczynnik tłumienia. Proszek stalowy i nano-krzemionka, choć w bardzo niewielkim stopniu w porównaniu z żelazofosforem, przyczyniły się do zwiększenia gęstości i liniowego współczynnika tłumienia. Może to być jedną z przyczyn ich mniejszych poziomów w związkach, na tle żelazofosforu. Całkowite zastąpienie kruszywa żelazofosforowego normalnym kruszywem, przy zachowaniu pozostałych materiałów na podobnym poziomie, spowodowało zwiększenie liniowego współczynnika tłumienia o 47%, po stwardnieniu betonu w ciągu 28 dni. Dodatek 5% nano-krzemionki, w stosunku do masy cementu użytego do produkcji betonu, było optymalnym udziałem procentowym, dla zwiększenia liniowego współczynnika tłumienia betonu. Po żelazofosforze, zastosowanie 20% proszku stalowego w stosunku do masy użytego cementu, było optymalnym dodatkiem dla zwiększenia gęstości betonu, aczkolwiek nieistotnym w porównaniu z żelazofosforem. Zastosowanie 5% nano-krzemionki w podobnych warunkach spowodowało wzrost liniowego współczynnika tłumienia betonu o 10%. Największy współczynnik tłumienia liniowego betonu po twardnieniu 28 dni – $0,29507 \text{ cm}^{-1}$ dotyczył próbki wykonanej w 65% z żelazofosforu, 30% proszku stalowego i 5% nano-krzemionki, a najniższy współczynnik – $0,15114 \text{ cm}^{-1}$, dotyczył próbki wykonanej w 8% z nano-krzemionki, bez dodatku żelazofosforu i proszku stalowego. Porównując nasze wyniki z wynikami badań Farokhzada i Sohrabiego (4) nad liniowym współczynnikiem tłumienia i wytrzymałością na ściskanie betonu ciężkiego, wykonanego z kruszywa barytowego zawierającego bizmut i proszek mikrokrzemionki, poddanego działaniu promieniowania gamma wykazano, że największy liniowy współczynnik tłumienia, uzyskany w niniejszej pracy był większy o 29%, w stosunku do najwyższego liniowego współczynnika tłumienia, uzyskanego we wspomnianej pracy. Proszek stalowy ze względu na swoją dużą liczbę atomową był chemicznie bardziej skuteczny w pochłanianiu przechodzących fotonów, niż proszek nano-krzemionkowy. Zastosowanie 30% proszku stalowego, w stosunku do masy cementu zawartego w betonie, znacznie zwiększyło liniowy współczynnik tłumienia, w porównaniu z innymi dodatkami. Zastosowanie 30% proszku stalowego, w podobnych warunkach, spowodowało wzrost liniowego współczynnika tłumienia betonu o 27%. Zastosowanie samego żelazofosforu w podobnych warunkach spowodowało zwiększenie liniowego współczynnika tłumienia betonu o 47%, w stosunku do próbki kontrolnej, która nie zawierała kruszywa żelazofosforowego. Dodanie 5% nano-krzemionki do próbek o tej samej zawartości żelazofosforu i stali, zwiększyło gęstość

9. Conclusion

The concrete density and the linear attenuation coefficient increased significantly with increasing addition of ferrophosphorus aggregates. Ferrophosphorus aggregate was the most effective factor in increasing concrete density and linear attenuation coefficient of concrete. Steel and nanosilica powder, although very slight compared to ferrophosphorus, played a certain role in increasing the density and linear attenuation coefficient, which may be among the reasons for their lower influence in comparison to ferrophosphorus. The complete replacement of the typical aggregate with ferrophosphorus aggregate caused the increase in the linear attenuation coefficient by 47%, at the concrete age of 28 days. The addition of 5% nanosilica, in relation to the cement mass used, was the optimal percentage to increase the linear attenuation coefficient. After ferrophosphorus, using 20% steel powder in relation to the used cement mass, was the optimal percentage in order to increase the concrete density, although insignificant compared to ferrophosphorus. Using 5% nanosilica in similar conditions increased the linear attenuation coefficient of the concrete by 10%. The highest linear attenuation coefficient of concrete at the age of 28 days – 0.295 was related to the sample made of 100% of ferrophosphorus, 30% of steel powder, and 5% of nanosilica and the lowest linear attenuation coefficient – 0.151 was related to the sample made of 8% nanosilica, without ferrophosphorus and steel powder. Comparing our results with those of the study by Farokhzad and Sohrabi (4) the linear attenuation coefficient and compressive strength of heavy mass concrete made of barite aggregate, containing bismuth and microsilica powder against gamma radiation, indicated the highest linear attenuation coefficient obtained in this study increased by 29% compared to the highest linear attenuation coefficient, obtained in the mentioned paper. Steel powder due to its high atomic number was chemically more effective in absorbing passing photons than nanosilica powder. Using 30% steel powder in relation to the cement mass used in concrete, significantly increased the linear attenuation coefficient, compared to other percentages. Using 30% steel powder in similar conditions increased the concrete linear attenuation coefficient by 27%. Using 100% ferrophosphorus in the similar conditions increased the linear attenuation coefficient of concrete by 47%, compared to the control sample, which did not contain ferrophosphorus aggregates. Adding 5% of nanosilica to samples, with the same percentages of ferrophosphorus and steel, was increasing the concrete density and linear attenuation coefficient. Increasing the concrete density was directly correlated with increasing the linear attenuation coefficient.

betonu i liniowy współczynnik tłumienia. Zwiększenie gęstości betonu było bezpośrednio skorelowane ze zwiększeniem liniowego współczynnika tłumienia.

Literatura / References

1. A. Delnavaz, A. Salavatiha, A. Kalhor, Effective parameters in gamma radiation transmission rate from heavy concrete with iron oxide and barite aggregates. *J. Mater. Civil Eng.* **29**(9) 04017140 (2017).
2. H.M. Qadr, Calculation of gamma-ray attenuation parameters for aluminium, iron, zirconium and tungsten. *Nucl. Phys. Inv.* **74**, 60-65 (2020).
3. A.S. Ouda, H.S. Abdelgader, Assessing the physical, mechanical properties, and γ -ray attenuation of heavy density concrete for radiation shielding purposes. *Geosystem Eng.* **22**(2), 72-80 (2019).
4. A. Sohrabi, R. Farokhzad, Investigating the linear attenuation coefficient and compression strength parameters of heavy concrete with barite aggregates containing bismuth powder and microsilica powder against gamma rays. *J. Struct. Constr. Eng.* **6**(Special Issue 2), 63-80 (2019).
5. C.C. Ban et al., Modern Heavyweight Concrete Shielding: Principles, Industrial Applications and Future Challenges; Review. *J. Build. Eng.* **39**, 102290 (2021).
6. M.A. Khalaf et al., Engineering and gamma-ray attenuation properties of steel furnace slag heavyweight concrete with nano calcium carbonate and silica. *Constr. Build. Mater.* **267**, 120878 (2021).
7. R. Farokhzad, A. Dadashi, A. Sohrabi, The effect of ferrophosphorus aggregate on physical and mechanical properties of heavy-weight concrete. *Constr. Build. Mater.* **299**, 123915 (2021).
8. M.S. Kharita, S. Yousef, M. Al Nassar, The effect of carbon powder addition on the properties of hematite radiation shielding concrete. *Progr. Nucl. Ener.* **51**(2), 388-392 (2009).
9. A. Sharma et al., Experimental investigations on mechanical and radiation shielding properties of hybrid lead-steel fiber reinforced concrete. *Nucl. Eng. Des.* **239**(7), 1180-1185 (2009).
10. F. Demir et al., Radiation transmission of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite for 6 MV and 18 MV X-rays using linear accelerator. *Ann. Nucl. Ener.* **37**(3), 339-344 (2010).
11. Y. Ghorbanirad, Evaluation of Iranian building codes and standards provided for steel and concrete structures in industrial buildings in the case of making a contract between Iran and Finland. 2018.
12. M.R. Shah-Nazari, Concrete laboratory guidelines according to ASTM regulations. *Science and Technology Publishing House* **110**, 15-60 (2007).
13. O. Gencel, W. Brostow, C. Ozel, An investigation on the concrete properties containing colemanite. *Int. J. Phys. Sci.* **5**(3), 216-225 (2010).
14. I. Bashter, Fast-neutron flux distribution in ducted light and heavy concrete shields. *Ann. Nucl. Ener.* **20**(8), 547-552 (1993).