

Shielding Properties of Heavy-Weight Concrete Containing Different Amounts of Iron Pellets

Seyed Abbas Hosseini^{1*}, Abdollah Karami², Mansour Bagheri³, Ameneh Yarinassab⁴

¹ Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Yasouj, Iran.

² Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

³ Faculty of Mining, Civil and Chemical Engineering, Brijand University of Technology, Birjand, Iran.

⁴ Faculty of Civil and Environment Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Review History:

Received: Aug. 14, 2024

Revised: Jan. 07, 2025

Accepted: Feb. 12, 2025

Available Online: Mar. 23, 2025

Keywords:

Heavyweight Concrete

Gamma-Ray

Iron Pellets

Compressive Strength

Shielding

ABSTRACT: With the increase in demand for electricity generation from nuclear energy and the use of radioactive materials for defensive or peaceful purposes, the need for radiation protection from these materials has also increased. One of the most common measures for structural and protective functions is the use of concrete walls as radiation shielding. The use of heavy aggregate in concrete can create a protective shield against harmful rays such as gamma and X-rays. Due to its high atomic number and high density, iron pellets are a suitable aggregate in heavyweight concrete. In this research, 25, 75 and 100% of concrete coarse aggregates were replaced with iron pellets, which had continuous grading and were in the range of coarse aggregate. At 28 days, the compressive strength and gamma-ray shielding properties were evaluated. To improve the mechanical performance of concrete, in some samples micro-silica was added to the amount of 10% of cement weight. The results showed that replacing all aggregates with iron pellets increases the linear attenuation coefficient of concrete by 38%. Although the use of micro-silica has little effect on the shielding properties of heavyweight concrete, it has improved the compressive strength of heavyweight concrete by 35%.

1- Introduction

Due to its radiation-shielding properties and other functionalities, there is a growing trend toward producing concrete with a higher density than conventional concrete, known as heavyweight concrete. Typically, concrete with a density exceeding 2600 kg/m³ is classified as heavyweight concrete. The classification of concrete into three categories—lightweight, normal, and heavyweight—primarily depends on the type of aggregate used [1]. In addition to density, the radiation-shielding effectiveness of heavyweight concrete is also influenced by the incorporation of metallic elements with high atomic numbers [2]. Consequently, using aggregates with both high density and high atomic numbers can significantly enhance radiation shielding. Otto et al. investigated the impact of magnetite aggregate in concrete on gamma radiation and highlighted its remarkable effectiveness in attenuating neutrons and gamma rays [3]. Similarly, Essen and Dugan assessed the mechanical properties and radiation transmission resistance of concrete by replacing 20% to 100% of its aggregate with limonite, a hydrous iron mineral [4].

Iron pellets, produced from iron ore powder, serve as raw materials in iron smelting furnaces for extracting pure iron. Karami et al. investigated the mechanical properties of heavyweight concrete containing iron pellets and iron

powder, where part of the cement was replaced with micro-silica. They reported an increase of up to 30% in compressive strength for this type of concrete [5]. In addition to the use of high-density aggregates, some studies have explored the effects of incorporating nano- and micro-sized materials to enhance the radiation-shielding properties of concrete [6]. Mesbahi and Ghiasi found that adding micro- and nano-sized powders of materials such as lead dioxide and hematite to conventional concrete resulted in up to 8% higher radiation shielding in samples containing nano-sized particles compared to those with micro-sized particles [7]. Khalaf et al. reported that incorporating a combination of nanomaterials, including 3% nano-silica and 2% nano-calcium carbonate, improved the protective properties of concrete against gamma radiation by up to 3.5% [8]. In most studies, the aggregates used were mined and processed for grain size modification. However, limited research has been conducted on the effects of iron aggregates, such as iron pellets, on the properties of heavyweight concrete.

Given the importance of increasing concrete density to enhance radiation protection, this study focuses on preparing heavyweight concrete using iron pellets as an aggregate. Iron pellets not only provide high density but also benefit from the high atomic number of iron, which improves their gamma

*Corresponding author's email: a.hosseini@yu.ac.ir



Fig. 1. Iron pellets and powder used in the mixing design

radiation shielding capabilities. Additionally, micro-silica was incorporated in specific proportions to further increase the density and refine the pore structure of the concrete.

2- Materials and methods

In this study, the concrete aggregate was replaced with iron pellets at 25%, 75%, and 100% ratios. The compressive strength of the concrete samples at 28 days of age, as well as their gamma radiation shielding properties, were investigated. As observed in the review of previous research on heavyweight concrete, increasing the proportion of iron aggregate typically enhances the protective properties of concrete but often leads to a reduction in compressive strength. Therefore, this study placed particular emphasis on this effect. To mitigate the reduction in compressive strength caused by the addition of coarse iron particles, micro-silica was incorporated into some of the mix designs. Figure 1 illustrates the iron pellets used in the study, while Table 1 presents the mix design configurations.

Table 2. Compressive strength and specific mass of concrete samples

Mixes	Density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)
C	2403	40
CM	2407	44
H25	2657	41
H25M	2653	43
H75	3165	41
H75M	3169	50
H100	3554	38
H100M	3589	54

3- Results and discussion

3- 1- Compressive strength and density

Table 2 presents the results of compressive strength and density for the heavyweight concrete specimens. As evident from Table 2, the density of the concrete increased with higher proportions of iron pellets and iron powder. Specifically, the specific gravity of samples containing 25%, 75%, and 100% iron aggregate increased by 11%, 32%, and 48%, respectively, compared to the control sample. The specific gravity of all samples containing iron pellets exceeded 2600 kg/m³, classifying them as heavyweight concrete according to the ACI code definition. These findings align with the results reported by other researchers [9]. For instance, Tayeh and Saffar observed a 10% increase in density when 30% of the conventional aggregate was replaced with iron chips [10].

The results also indicate that in heavyweight concrete, as the percentage of iron pellets and flakes increases, the compressive strength remains relatively unchanged or even decreases slightly unless micro-silica is added to the mix design.

Table 1. Mixes design and material compositions in one cubic meter of concrete samples

Mixes	water (kg)	cement (kg)	Iron powder (%)	Iron pelts (%)	Iron powder (kg)	Iron pelts (kg)	Fine aggregates (kg)	Coarse aggregates (kg)	Micro-silica(kg)
C	180	400	-	-	-	-	960	860	-
CM	180	360	-	-	-	-	960	860	40
H25	180	400	25	25	336	336	720	645	-
H25M	180	360	25	25	336	336	720	645	40
H75	180	400	75	75	1050	1050	240	215	-
H75M	180	360	75	75	1050	1050	240	215	40
H100	180	400	75	100	1050	1350	240	-	-
H100M	180	360	75	100	1050	1350	240	-	40



Fig. 2. Gamma source, detector, and the condition of the specimen

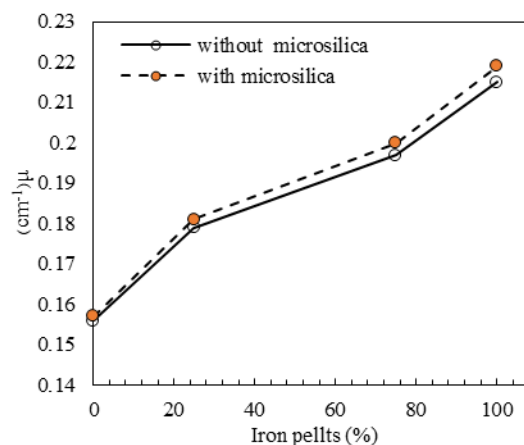


Fig. 3. Effect of iron pellet and micro-silica on linear attenuation coefficient

3- 2- Gamma ray radiation shielding

For gamma radiation protection testing, a cesium source was used, as shown in Figure 2. Figure 3 shows the percentage of radiation transmitted through different samples compared to the reference sample. One of the important parameters for evaluating radiation shielding is the linear attenuation coefficient (μ). This coefficient represents the fraction of photons that are attenuated when passing through one centimeter of material. This coefficient is calculated based on the Beer-Lambert law as follows:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I_x} \right) \quad (1)$$

which, μ represents the linear attenuation coefficient, expressed in cm^{-1} , x is the thickness of the material (cm), and I_0 and I_x denote the initial radiation intensity and the radiation intensity after passing through a material thickness of x , respectively. The values obtained for the linear attenuation coefficient of the specimens, based on the amount of iron pellets, are shown in Figure 3. As evident from the figure, the inclusion of micro-silica has slightly increased the linear attenuation coefficient of heavyweight concrete, thereby improving its radiation-shielding properties to a small extent. With an increase in the amount of iron aggregate, the μ coefficient has risen significantly. For instance, the value of μ increased from 0.156 for the control sample to 0.215 for the sample containing 100% iron pellets, representing a 38% increase in the μ coefficient.

4- Conclusions

In this study, the density, compressive strength, and gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete were evaluated. The concrete mixtures contained varying percentages of iron pellets and 10% micro-silica. The

following general results were obtained:

As the percentage of iron pellet aggregate in concrete increased, the compressive strength remained nearly constant. However, when all aggregates were replaced with iron pellets, the compressive strength experienced a slight decrease. In contrast, the compressive strength of concrete containing micro-silica increased with higher proportions of iron pellets.

The inclusion of micro-silica did not significantly enhance the radiation-shielding properties of concrete. However, by improving the compressive strength of the concrete, it counteracted the reduction in strength caused by the iron pellet aggregate. Consequently, the simultaneous use of iron pellets and micro-silica can enhance both the mechanical performance and radiation protection properties of heavyweight concrete.

References

- [1] Y. Zhou, X. Chen, Y. Zhan, S. Wang, J. Xu, Review of the transmittance effects and long-term radiation mechanisms of γ on heavy concrete, *Progress in Nuclear Energy*, 175 (2024) 105353.
- [2] A.H. Abdalsalam, M. Sayyed, T.A. Hussein, E. Şakar, M.H.A. Mhareb, B.C. Şakar, B. Alim, K.M. Kaky, A study of gamma attenuation property of UHMWPE/Bi2O3 nanocomposites, *Chemical Physics*, 523 (2019) 92-98.
- [3] B. Oto, A. Gür, E. Kavaz, T. Çakır, N. Yaltay, Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes, *Progress in Nuclear Energy*, 92 (2016) 71-80.
- [4] Y. Esen, Z.M. Doğan, Investigation of usability of limonite aggregate in heavy-weight concrete production, *Progress in Nuclear Energy*, 105 (2018) 185-193.
- [5] A. Karami, A. Abbasi Dezfooli, S.A. Hosseini, Mechanical Properties and Permeability of Heavyweight

- Concrete Containing Iron Pellets, Crumb Iron, and Microsilica, *Concrete Research*, 15(3) (2022) 45-55.
- [6] S.E. Milasi, D. Mostofinejad, H. Bahmani, Improving the resistance of ultra-high-performance concrete against nuclear radiation: Replacing cement with Barite, hematite, and lead powder, *Developments in the Built Environment*, 15 (2023) 100190.
- [7] A. Mesbahi, H. Ghiasi, Shielding properties of the ordinary concrete loaded with micro-and nano-particles against neutron and gamma radiations, *Applied Radiation and Isotopes*, 136 (2018) 27-31.
- [8] M.A. Khalaf, C.B. Cheah, M. Ramli, N.M. Ahmed, A.M.A. Al-Asady, A.M.A. Ali, A. Al-Shwaiter, W. Tangchirapat, Engineering and gamma-ray attenuation properties of steel furnace slag heavyweight concrete with nano calcium carbonate and silica, *Construction and Building Materials*, 267 (2021) 120878.
- [9] M.J. Miah, M.K. Ali, S.C. Paul, A. John Babafemi, S.Y. Kong, B. Šavija, Effect of recycled iron powder as fine aggregate on the mechanical, durability, and high temperature behavior of mortars, *Materials*, 13(5) (2020) 1168.
- [10] B.A. Tayeh, D.M. Al Saffar, Utilization of waste iron powder as fine aggregate in cement mortar, *Journal of engineering Research and Technology*, 5(2) (2018).



بررسی حفاظت در برابر اشعه‌ی گاما در بتن سنگین دارای مقادیر مختلف سنگدانه‌ی آهنی

سید عباس حسینی^{۱*}، عبدالله کرمی^۲، منصور باقری^۳، آمنه یاری نسب^۴

- ۱- دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران،
- ۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران.
- ۳- دانشکده مهندسی معدن، عمران، شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۴- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۰۳

کلمات کلیدی:

بتن سنگین
اشعه‌ی گاما
سنگدانه‌ی آهن
مقاومت فشاری
حفاظت در برابر اشعه

خلاصه: با افزایش تقاضا برای تولید برق از انرژی هسته‌ای و همچنین استفاده از مواد رادیواکتیو به منظور اهداف دفاعی و یا صلح آمیز، ضرورت انجام اقدامات حفاظتی جهت جلوگیری از گسترش تشعشعات مضر این مواد نیز بیشتر شده است. یکی از متداول‌ترین اقدامات جهت کارکردهای سازه‌ای و همچنین حفاظتی، استفاده از جدارهای بتنی با قدرت بازدارنده‌گی و حفاظتی در برابر عبور تشعشعات است. استفاده از سنگدانه‌ی سنگین در ساخت بتن این دیوارها می‌تواند موجب ایجاد یک سپر حفاظتی در برابر اشعه‌های مضر مانند گاما و ایکس شود. سنگدانه‌ی آهنی به دلیل عدد اتمی بالا و همچنین چگالی زیاد یکی از مواد پر کاربرد در ساخت بتن سنگین است. در این تحقیق، ۲۵، ۷۵ و ۱۰۰ درصد درشت‌دانه بتن با سنگدانه‌ی آهنی که دارای دانه بندی پیوسته و در محدوده درشت دانه بوده است جایگزین شده و در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری و مقاومت در برابر عبور اشعه‌ی گاما از طریق چشمه سزیم مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور بهبود عملکرد مکانیکی بتن، در برخی نمونه‌ها میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزن سیمان نیز اضافه شده است. نتایج نشان داد که استفاده کامل از سنگدانه‌ی آهنی به عنوان سنگدانه، موجب افزایش ۳۸ درصدی در ضریب تضعیف خطی بتن می‌گردد. همچنین استفاده از میکروسیلیس هرچند در خاصیت حفاظتی بتن سنگین تاثیر کمی داشته ولی موجب بهبود مقاومت فشاری بتن سنگین تا ۳۵ درصد شده است.

۱- مقدمه

استفاده از بتن در انواع و ترکیب‌های متنوع به دلیل عملکرد مکانیکی مناسب، دوام و همچنین مقرون به صرفه بودن، روز به روز در حال گسترش است. علاوه بر این، قدرت بتن در ایجاد یک سپر حفاظتی در برابر اشعه‌های مضر رادیواکتیو که عموماً از طریق افزودن مواد مناسب به طرح اختلاط بتن ایجاد می‌شود، موجب بکارگیری آن در تاسیسات هسته‌ای به عنوان پوسته‌ی حفاظتی در برابر تشعشعات مضر رادیواکتیو شده است [۱]. در نیروگاه هسته‌ای، بتن در یک لایه‌ی ضخیم در اطراف تاسیسات اجرا می‌شود تا با جذب اشعه‌های ساطع شده، اثرات زیانبار این تاسیسات بر محیط زیست کاهش یابد. چگالی بتن، عدد اتمی مواد تشکیل دهنده بتن و میزان قدرت اشعه‌ی ساطع شده، عوامل اصلی در کیفیت سپر حفاظتی بتن در برابر اشعه هستند [۲]. در میان عوامل فوق، تحقیقات نشان داده است که افزایش چگالی تاثیر بیشتری در افزایش قدرت حفاظتی بتن در برابر تشعشعات دارد [۳]. با

توجه به اینکه اکثر حجم بتن را سنگدانه تشکیل می‌دهد؛ بنابراین چگالی بتن وابسته به چگالی سنگدانه است و با افزایش چگالی سنگدانه می‌توان اثر حفاظتی بتن در برابر تشعشعات هسته‌ای مانند اشعه گاما را افزایش داد [۴، ۵]. به دلیل اثر حفاظتی در برابر تشعشعات و همچنین دیگر کارکردها، تمایل به ساخت بتنی با چگالی بیشتر از بتن معمولی که از آن به عنوان بتن سنگین نام برده می‌شود، در حال افزایش است. به صورت معمول، وقتی چگالی بتن بیشتر از ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد، به عنوان بتن سنگین شناخته می‌شود. عامل اصلی در دسته‌بندی بتن به سه دسته سبک، معمولی و سنگین، نوع سنگدانه است. چگالی بتن سنگین بر اساس ترکیبات انتخاب شده به عنوان سنگدانه می‌تواند حتی تا ۵۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب نیز افزایش پیدا کند [۶]. اثر حفاظتی بتن سنگین در برابر اشعه علاوه بر وابستگی به چگالی، به استفاده از عناصر فلزی با عدد اتمی بالا نیز نسبت داده شده است [۷]. بنابراین استفاده از سنگدانه با چگالی و همچنین عدد اتمی بالا می‌تواند اثرگذاری بیشتری در برابر تشعشعات اتمی داشته باشد.

تحقیقات زیادی درباره تولید و خواص بتن سنگین انجام شده است

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.hosseini@yu.ac.ir



نانو و میکرو در افزایش مقاومت بتن در برابر عبور اشعه نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. مصباحی و قیاسی با اضافه کردن پودر موادی مانند دی اکسید سرب و هماتیت در ابعاد میکرو و نانو به بتن معمولی، افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی مواد نانو تا ۸ درصد بیشتر از نمونه‌های حاوی ذرات میکرو بوده است [۱۳]. خلاف و همکاران^۶ گزارش کردند که اضافه کردن ترکیبی از مواد نانو شامل ۳ درصد نانو سیلیس و ۲ درصد نانو کربنات کلسیم موجب بهبود خواص حفاظتی بتن در برابر اشعه گاما تا ۳/۵ درصد می‌شود [۱۴]. در اکثر تحقیقات صورت گرفته، سنگدانه‌ی مصرفی از معادن استخراج شده و بعد از اصلاح دانه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تحقیقات ناچیزی درباره اثرات سنگدانه‌ی آهنی متشکل از گندله‌ی آهن بر خواص بتن سنگین صورت گرفته است.

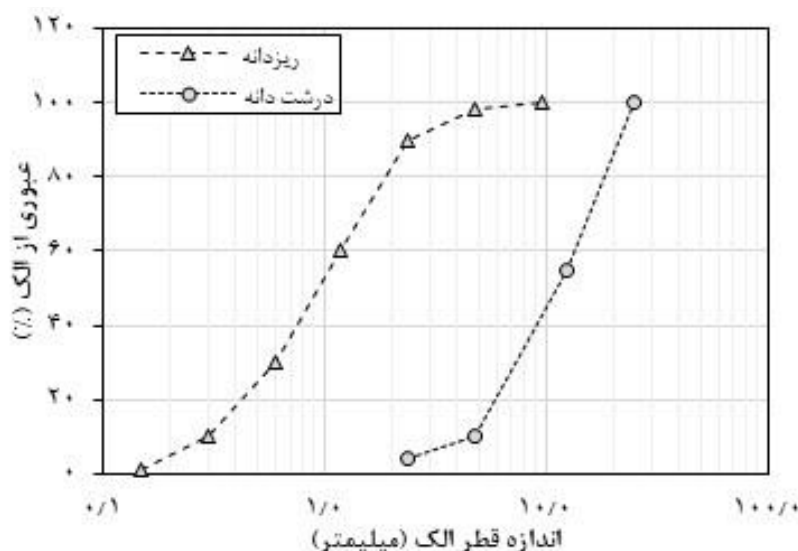
یکی دیگر از رویکردهایی که در سال‌های اخیر برای تولید قطعات بتنی ضد اشعه مورد توجه قرار گرفته، استفاده از مواد نانو و میکرو مقیاس در بتن بوده است [۱۵] [۱۶]. این مواد به دلیل اینکه منافذ ریز مقیاس ساختار بتن را پر می‌کنند موجب افزایش دوام بتن و همچنین ایجاد یک ماده با تراکم بیشتر می‌شوند [۱۷]. بسیاری از تحقیقات نشان دهنده‌ی رابطه‌ی بین مقدار سیلیکا در بتن و قدرت جذب اشعه گاما بوده است [۱۸]. از طرف دیگر وجود یک رابطه‌ی مستقیم بین مقاومت فشاری بتن سنگین و میرایی اشعه گاما در عبور از این نوع بتن نیز گزارش شده است [۱۹]. مواد مورد استفاده در بتن سنگین علاوه بر میکرو سیلیس و نانو سیلیس شامل مواد نانوی با چگالی بالا شامل نانو فریت، نانو تنگستن و مواد بر پایه عنصر آهن بوده است [۲۰، ۲۱]. با وجود انجام تحقیقات مختلف بر این مواد، رابطه‌ی بین درصد مواد با خاصیت حفاظت در برابر اشعه بتن به صورت مشخص ارائه نشده است [۲۲]. به دلیل گسترش استفاده از انرژی صلح آمیز هسته‌ای و اتکا بر مصالح بومی جهت تولید بتن سنگینی که در برابر اشعه دارای حفاظت کافی باشد و همچنین به دلیل کمبود تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، نیاز به تحقیقات درباره این نوع بتن در کشور به شدت احساس می‌شود. با توجه به اهمیت افزایش چگالی بتن جهت ارتقای کیفیت حفاظت در برابر تشعشعات، در این مقاله، از سنگدانه‌ی آهنی با نام گندله‌ی آهن که علاوه بر چگالی بالا دارای عنصر آهن با عدد اتمی بالا است، بتن سنگین تهیه شده و توانایی آن جهت حفاظت در برابر اشعه گاما مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر این، از میکرو سیلیس با درصد مشخص جهت افزایش تراکم و بهبود ساختار منافذ بتن در این تحقیق استفاده شده است.

که در اکثر آنها خواص مکانیکی و دوام و در برخی نیز خواص حفاظتی در برابر تشعشعات مورد بررسی قرار گرفته است. اتو و همکاران^۱ اثر استفاده از سنگدانه‌ی مگنتیت در بتن را در برابر اشعه گاما مورد ارزیابی قرار دادند و اثرات زیاد این سنگدانه در مقاومت در برابر عبور نوترون‌ها و اشعه گاما را گزارش کردند [۸]. اسن و دوگان^۲ با جایگزینی ۲۰ تا ۱۰۰ درصد سنگدانه بتن با لیمونیت که یک کانی آهن آبدار است، خواص مکانیکی و همچنین مقاومت آن در برابر عبور اشعه را مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. طبق نتایج ارائه شده از این محققان، هرچند قابلیت عبور تشعشعات در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی لیمونیت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است؛ ولی خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نیز دچار نقصان گردیده است. جونیور و همکاران^۳ ضریب تضعیف خطی بتن (μ) که معیاری از احتمال اثرگذاری فوتون‌های عبوری از طولی مشخص از بتن است را در بتن ساخته شده از مقادیر مختلف سنگدانه باریت مورد ارزیابی قرار داده و اثر انرژی فوتون ساطع شده و همچنین چگالی سپر محافظتی در افزایش ضریب تضعیف خطی بتن را گزارش کرده‌اند [۹]. گونزالس و همکاران^۴ اثرات نامطلوب سنگدانه‌ی باریت بر مقاومت فشاری بتن، باوجود اثرات بهبود دهنده آن در برابر تشعشعات ساطع شده از تاسیسات هسته‌ای و تجهیزات بیمارستانی را گزارش کرده و مقادیر کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی سنگدانه مگنتیت را کمتر از نمونه‌های حاوی باریت گزارش کرده‌اند [۱۰].

گندله‌ی آهن^۵ از پودر سنگ آهن تولید شده و به عنوان ماده‌ی اولیه در کوره‌های آهن گدازی جهت استحصال آهن خالص مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع به جای قرار دادن مستقیم سنگ آهن و یا پودر سنگ آهن در کوره، به دلیل اشکالاتی که در تولید ایجاد می‌شود و همچنین به منظور افزایش آهن کسناتر، سنگ آهن را پودر کرده و بعد از اصلاح برخی ترکیبات، تبدیل به سنگدانه‌هایی به ابعاد ۵ تا ۲۵ میلی‌متر می‌کنند. به دلیل مقاومت و چگالی بالای این سنگدانه‌ها، تحقیقاتی در زمینه امکان استفاده از آنها عنوان سنگدانه‌ی بتن انجام گرفته است. کرمی و همکاران خواص مکانیکی بتن سنگین حاوی گندله و پودر آهن را که بخشی از سیمان نیز با میکروسیلیس جایگزین شده بود را مورد ارزیابی قرار داده و افزایش تا ۳۰ درصد مقاومت فشاری در این نوع بتن را گزارش کرده‌اند [۱۱]. علاوه بر استفاده از سنگدانه با چگالی بالا، در برخی تحقیقات اثر استفاده از مواد

1. Oto et al.
2. Esen and Dogan
3. Jonior et al.
4. González et al.
5. Iron ore pellets

6. Khalaf et al.



شکل ۱. نمودار دانه بندی اصلاح شده سنگدانه مورد استفاده

Fig. 1. Modified aggregate grading diagram

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی گندله آهن

Table 1. Chemical composition of iron pellets

Fe (T)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	P	S	ترکیب
۶۸	۳/۵	۰/۷	۱/۵	۱/۶	۱/۲	۰/۰۷	۰/۰۱	مقدار

۲- مواد و روش‌ها

همانطور که در بررسی تحقیقات انجام گرفته بر روی بتن سنگین مشخص شد، معمولاً با افزایش مقدار سنگدانه‌ی آهنی با وجود افزایش خواص حفاظتی بتن، مقاومت فشاری دچار کاهش شده است؛ از اینرو در این تحقیق این اثر بیشتر مورد توجه قرار گرفته و برای کم کردن اثرات کاهش اضافه کردن درشت دانه آهنی، میکرو سیلیس به برخی طرح‌ها اضافه شده است. در این بخش به تشریح خواص مصالح مورد استفاده و روند تهیه نمونه‌ها و فرآیند آزمایش‌ها پرداخته شده است.

۲-۱- مواد و مصالح

مواد و مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌های مورد مطالعه به صورت کلی شامل؛ سیمان پرتلند معمولی نوع ۱، آب شرب شهر بوشهر،

ریزدانه و درشت دانه از معادن شهر بوشهر، سنگدانه آهنی از معادن گل گهر سیرجان، پوسته آهن اهواز، میکروسیلیس ازنا و فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات بوده است.

سنگدانه با نمودار دانه بندی اصلاح شده که در شکل ۱ نشان داده شده است دارای چگالی اشباع با سطح خشک ۲۵۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب برای درشت دانه و ۲۶۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب برای ریزدانه بوده است. درصد جذب آب برای درشت دانه و ریز دانه به ترتیب برابر با ۱/۶ و ۱/۵۶ بدست آمده است. گندله آهن با چگالی ظاهری ۴۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده با ترکیبات شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱ به همراه پوسته آهن با چگالی ظاهری ۴۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. وضعیت ظاهری سنگدانه‌ی آهنی و پوسته آهن مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. گندله و پودر آهن استفاده شده در طرح اختلاطها

Fig. 2. Iron pellets and powder used in the mixing design

جدول ۳. مشخصات پودر میکروسیلیس

Table 3. Micro silica powder specifications

سیلیس (%)	رطوبت (%)	چگالی (kg/m^3)	بلین (m^2/gr)
۹۲	۰/۲۶	۲۱۵	۲۲

جدول ۲. مشخصات سیمان نوع ۱ مورد استفاده در تحقیق

Table 2. Specifications of type 1 cement used in the mixing design

گیرش اولیه	گیرش نهایی	مقاومت فشاری (Kg/cm^2)	
(دقیقه)	(دقیقه)	۳ روزه	۷ روزه
۱۸۰	۲۲۰	۲۵۰	۴۰۲
		۵۴۳	۲۸ روزه

جدول ۴. مشخصات فوق روان کننده پلی کربوکسیلات

Table 4. Polycarboxylate Superplasticizer Specifications

نام	pH	مواد جامد (%)	نسبت وزن مخصوص
HF5000M	۷/۲	۳۴	۱/۰۲

مشخصات سیمان نوع ۱ مورد استفاده در این تحقیق شامل زمان‌های گیرش اولیه و نهایی و مقاومت نمونه‌های ساخته شده از آن در سنین مختلف جهت کنترل کیفیت در جدول ۲ نشان داده شده است. میکروسیلیس به صورت پودر و با مشخصات نشان داده شده در جدول ۳ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. جهت دستیابی به روانی ثابت و کاهش نسبت آب به سیمان از فوق روان کننده پلی کربوکسیلات با مشخصات ارائه شده در جدول ۴ استفاده شده است.

۲-۲- ترکیب و ساخت نمونه‌ها

با توجه به اینکه در این پژوهش، هدف، بررسی خاصیت بتن سنگین با درصد جایگزینی بالایی از سنگدانه با سنگدانه‌ی آهنی بوده است، شش طرح اختلاط به همراه نمونه‌ی شاهد مورد ارزیابی قرار گرفته است. در طرح اختلاط‌های اصلی، ۲۵، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزن سنگدانه با ترکیبی از

سنگدانه‌ی آهنی و خرده آهن جایگزین شده است. در جدول ۵ ترکیبات مختلف طرح اختلاط‌ها به همراه نام نمونه‌ها نشان داده شده است. نمونه‌ی مرجع (شاهد) با عنوان C، نمونه‌های دارای میکروسیلیس با پسوند M نشان داده شده‌اند. نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی آهنی با عنوان H نشان داده شده‌اند که عدد بعد از آن بیانگر درصد سنگدانه‌ی آهنی در طرح اختلاط است.

جدول ۵. نام گذاری نمونه‌ها و ترکیبات مصالح در یک متر مکعب

Table 5. Naming of samples and material compositions in one cubic meter

نام طرح	آب (kg)	سیمان (kg)	میکرو سیلیس (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)	گندله آهن (kg)	پوسته آهن (kg)	گندله آهن (%)	پوسته آهن (%)
C	۱۸۰	۴۰۰	—	۸۶۰	۹۶۰	—	—	—	—
CM	۱۸۰	۳۶۰	۴۰	۸۶۰	۹۶۰	—	—	—	—
H25	۱۸۰	۴۰۰	—	۶۴۵	۷۲۰	۳۳۶	۳۳۶	۲۵	۲۵
H25M	۱۸۰	۳۶۰	۴۰	۶۴۵	۷۲۰	۳۳۶	۳۳۶	۲۵	۲۵
H75	۱۸۰	۴۰۰	—	۲۱۵	۲۴۰	۱۰۵۰	۱۰۵۰	۷۵	۷۵
H75M	۱۸۰	۳۶۰	۴۰	۲۱۵	۲۴۰	۱۰۵۰	۱۰۵۰	۷۵	۷۵
H100	۱۸۰	۴۰۰	—	—	۲۴۰	۱۳۵۰	۱۰۵۰	۱۰۰	۷۵
H100M	۱۸۰	۳۶۰	۴۰	—	۲۴۰	۱۳۵۰	۱۰۵۰	۱۰۰	۷۵

طرح اختلاط، سه نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و سه نمونه برای آزمایش اشعه گاما ساخته شده است. شرایط عمل‌آوری طبق استاندارد ASTM C192 بوده؛ به طوری که نمونه‌ها بعد از قالب گیری به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و در زیر پوشش پلاستیکی جهت حفظ رطوبت نگهداری شدند و سپس به محیط عمل‌آوری و در حوضچه‌های با شرایط دمای ثابت قرار داده شدند [۲۳].

۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها و فرآیند انجام آزمایش‌ها

نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری در شرایط استاندارد از حوضچه خارج گردیده و آزمایش‌ها مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM318-19 بر روی نمونه‌های اشباع با سطح خشک توسط جک هیدرولیکی انجام گرفت. قبل از آزمایش مقاومت فشاری، وزن مخصوص نمونه‌ها مطابق با استاندارد EN 12390-7 اندازه گیری گردید. برای ساخت نمونه‌های قابل قرارگیری در محفظه‌ی بتنی آزمایش قابلیت عبور تشعشعات گاما، با استفاده از دستگاه مغزه گیری، نمونه‌های به قطر ۱۰ سانتی‌متر از مرکز نمونه‌های عمل‌آوری شده استخراج گردید. وضعیت نمونه‌های استخراج شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، سنگدانه‌های سیاه رنگ، گندله آهن هستند. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نمونه‌ها سپس درون محفظه‌ی بتنی به نحوی قرار داده شدند که یک سطح آن در معرض تشعشعات چشمه گاما و سطح دیگر آن دستگاه آشکار ساز قرار داده شود.

با توجه به عدم یکنواختی سنگدانه‌ی آهنی و پوسته‌ی آهن، در شرایطی که همه‌ی درشت دانه به منظور جایگزینی با گندله حذف گردیده است؛ کماکان حدود ۲۰ درصد از ریزدانه برای ایجاد یکنواختی و عدم تخلخل و حفظ کارایی از طرح حذف نگردیده است. میکروسیلیس نیز هم به عنوان یک ماده پوزولان موثر بر مقاومت فشاری و هم برای افزایش تراکم به طرح اضافه گردیده است. به منظور جایگزینی بخشی از سنگدانه با سنگدانه آهنی و پوسته‌ی آهن، ابتدا به صورت وزنی درصد مورد نظر از سنگدانه حذف گردیده و سپس معادل حجم حذف شده‌ی سنگدانه، به طرح اختلاط، گندله و پوسته آهن اضافه شده است. به عنوان نمونه، همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است در طرح H25 که بیانگر وجود ۲۵ درصد گندله و پوسته آهن می‌باشد، ابتدا ۲۵ درصد وزن درشت دانه که معادل ۲۱۵ کیلوگرم شن است از طرح حذف شده و حجم معادل آن سنگدانه‌ی آهنی اضافه شده که این حجم، وزنی برابر با ۳۳۶ کیلوگرم داشته است.

در این پژوهش، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۵ و برای ایجاد کارایی یکسان برای همه طرح‌ها، از فوق روان کننده استفاده شده تا اسلامپ نمونه‌ها به حدود ۱۰ سانتی‌متر برسد. نمونه‌های ساخته شده در دو گروه و ابعاد ساخته شدند؛ یک گروه برای ارزیابی مقاومت فشاری که شامل نمونه‌های مکعب‌های به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر و گروه دوم به منظور بررسی در برابر اشعه‌ی گاما که شامل نمونه‌های استوانه‌ای بوده است. برای هر



شکل ۴. نحوه قرار گیری چشمه گاما و آشکار ساز و وضعیت نمونه و پوشش بتنی محافظ

Fig. 4. Location of the gamma source and detector, and the position of the specimen and protective concrete cover.



شکل ۳. مغزه گیری از نمونه بتنی جهت انجام آزمایش اشعه (نمونه H25)

Fig. 3. Core taken from a concrete sample for radiation testing (H25 sample)

جدول ۶: مقاومت فشاری و جرم مخصوص نمونه‌های بتنی

Table 6. Compressive strength and density of concrete samples

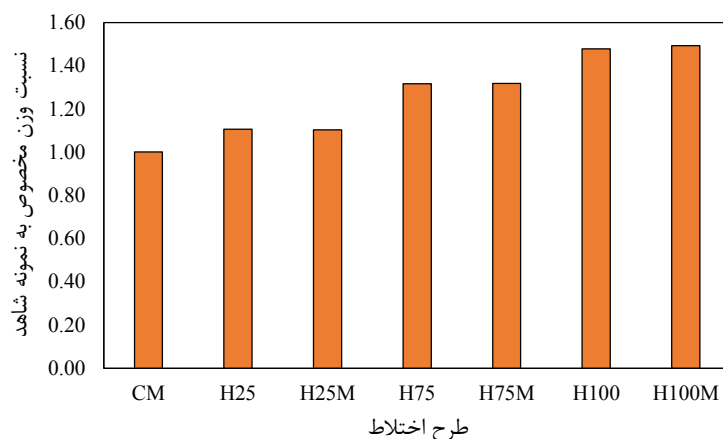
ردیف	نام طرح	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	وزن مخصوص بتن (kg/m^3)
۱	C	۴۰	۲۴۰۳
۲	CM	۴۴	۲۴۰۷
۳	H25	۴۱	۲۶۵۹
۴	H25M	۴۳	۲۶۵۳
۵	H75	۴۱	۳۱۶۵
۶	H75M	۵۰	۳۱۶۹
۷	H100	۳۸	۳۵۵۴
۸	H100M	۵۴	۳۵۸۹

مشخص است که با افزایش مقدار گندله و پوسته آهنی در بتن، مقدار چگالی افزایش یافته است به طوریکه وزن مخصوص برای نمونه‌های حاوی ۲۵، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگدانه آهنی به ترتیب ۱۱، ۳۲ و ۴۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. جرم مخصوص همه‌ی نمونه‌های حاوی گندله‌ی آهن بیشتر از ۲۶۰۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌باشد که از این نظر و طبق تعریف آیین نامه‌ی ACI در دسته‌ی بتن سنگین قرار می‌گیرند. نتایج

۳- نتایج آزمایش‌ها و بحث

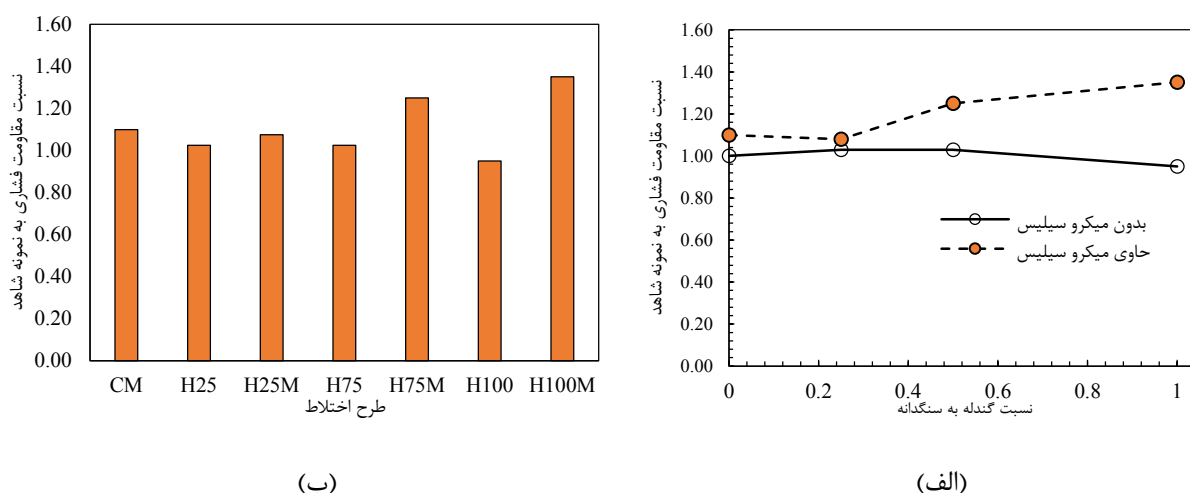
۳-۱- مقاومت فشاری و چگالی

در جدول ۶ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و چگالی بتن سنگین آورده شده است. نتایج ارائه شده، میانگین ۳ آزمایش انجام شده بر روی هر طرح اختلاط می‌باشد. در شکل ۵ نسبت چگالی نمونه‌ها به نمونه مرجع نشان داده شده است. از نتایج ارائه شده در جدول ۶ و شکل ۵



شکل ۵. نسبت جرم مخصوص نمونه‌ها به جرم مخصوص نمونه شاهد

Fig. 5. Ratio of the density of specimens to the density of the control sample



شکل ۶. نسبت مقاومت فشاری نمونه‌ها به مقاومت فشاری نمونه شاهد (سن ۲۸ روز)

Fig. 6. The ratio of the compressive strength of specimens to the compressive strength of the control sample (28 days)

و حتی در برخی موارد مقاومت فشاری مقدار جزئی دچار کاهش خواهد گردید. این نتیجه با نتایج سایر محققان که اضافه کردن سنگدانه‌های آهنی را دارای اثرات کاهشی بر مقاومت فشاری گزارش کرده اند منطبق است (۹ و ۱۰). جایگزینی ۱۰ درصد از سیمان طرح اختلاط با میکروسیلیس تاثیر بسیار زیادی در افزایش مقاومت فشاری مخصوصاً در نمونه‌های حاوی مقادیر بیشتر سنگدانه شامل سنگدانه‌ی آهنی و پوسته آهن شده است. از جدول ۶ مشخص است که در نمونه‌ی مرجع مقاومت از ۴۰ به ۴۴ مگاپاسکال افزایش یافته (۱۰ درصد افزایش) ولی در نمونه با ۱۰۰ درصد گندله و پوسته آهن،

ارائه شده با نتایج حاصل از جایگزینی سنگدانه با خرده آهن که توسط برخی محققین انجام گرفته است همخوانی دارد [۲۴، ۲۵]. به عنوان نمونه، تابه و صفار افزایش ۱۰ درصدی چگالی به واسطه جایگزینی ۳۰ درصد از سنگدانه معمولی با خرده آهن را گزارش کرده‌اند [۲۶].

نسبت مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به مقاومت نمونه مرجع (C) سن ۲۸ روز در شکل ۶ نشان داده شده است. از نتایج مشخص است که در بتن سنگین با زیاد شدن درصد گندله و پوسته آهن در صورتی که به طرح میکروسیلیس اضافه نشود مقدار مقاومت فشاری تغییر چندانی نخواهد داشت

جدول ۷. گذردهی پرتو گاما از حفاظ بتنی

Table 7. Gamma-ray transmission through the specimens

ردیف	نام طرح	دوز عبوری (میکروسیورت)
۱	C	۳/۷۹
۲	CM	۳/۶۵
۳	H25	۱/۹۱
۴	H25M	۱/۸
۵	H75	۱/۱۲
۶	H75M	۱/۰۳
۷	H100	۰/۶۵
۸	H100M	۰/۵۷

میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت از ۳۸ به ۵۴ مگاپاسکال شده است که بیانگر افزایش ۳۵ درصدی در مقاومت فشاری است.

در مقایسه با نتایج بدست آمده از سایر محققان می‌توان اشاره کرد که نتایج با نتایج کرمی و همکاران تطابق دارد و بجز تفاوت در مقاومت نمونه‌ی حاوی ۱۰۰ درصد گندله، بقیه نتایج به نتایج کرمی و همکاران نزدیک می‌باشد [۱۱]. هلمند و ساینی^۱ افزایش ۲۶ درصدی در مقاومت فشاری در صورت جایگزینی ریز دانه با خرده آهن را گزارش کرده‌اند [۲۷]. برخلاف نتایج گزارش شده توسط ساتیپاراخ و همکاران، نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد که بدون استفاده از میکروسیلیس و با وجود جایگزینی درشت دانه و ریزدانه چنین افزایشی امکان پذیر نخواهد بود. در نمونه‌های فاقد میکروسیلیس در واقع حفرات ایجاد شده به دلیل شکل پولکی پوسته‌های آهن می‌تواند در کم کردن تاثیر سنگدانه سنگین موثر باشد که این موضوع توسط برخی محققین مانند تایه و سافر^۲ نیز گزارش شده است [۲۶]. اوودا و عبدالقادر^۳ کاهش مقاومت فشاری و کششی در بتن با درصد جایگزینی بیشتر از ۵۰ درصد سنگدانه با سنگدانه سنگین را گزارش کرده‌اند [۲۸].

۳-۲- مقاومت در برابر اشعه‌ی گاما

برای اندازه گیری مقدار اشعه گاما عبوری از نمونه بتنی همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقادیر اشعه بر اساس دوز معادل اندازه گیری شده است. دوز معادل بیانگر اثرات بیولوژیکی ناشی از جذب پرتو با در نظر گرفتن ضریب توزین پرتو می باشد. دوز معادل بر اساس دوز جذبی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H_{T,R} = D_{T,R} W_R \quad (1)$$

در این رابطه، $H_{T,R}$ دوز معادل (سیورت)، $D_{T,R}$ دوز جذبی که بیانگر انرژی جذب شده در واحد جرم است (ژول بر کیلوگرم یا گری) و W_R ضریب توزین پرتو که بستگی به نوع و منشأ پرتو دارد. ضریب توزین پرتو برای اشعه‌ی گاما برابر با یک در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به میزان گذردهی اشعه‌ی گاما بر در جدول ۷ نشان داده شده است.

یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی قدرت حفاظت در برابر اشعه،

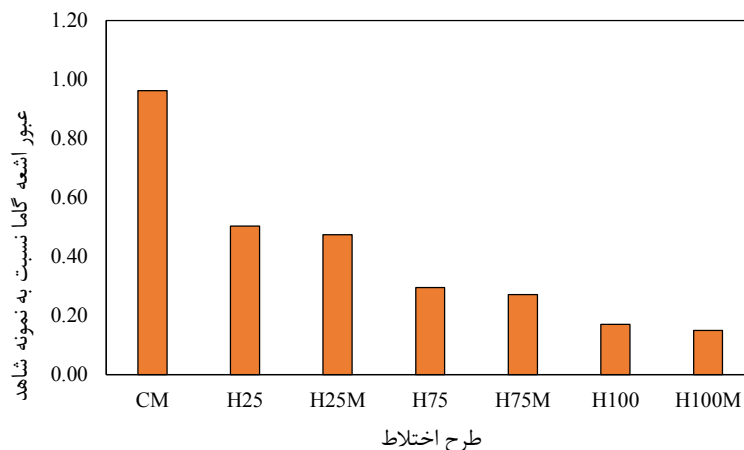
ضریب تضعیف خطی^۴ (μ) است. این ضریب بیانگر کسری از فوتون‌ها است که در عبور از یک سانتیمتر ماده کاهش می‌یابد و واحد آن cm^{-1} است. این ضریب بر اساس قانون بیر لامبرت به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۹]:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I_x} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، x نیز ضخامت ماده (سانتیمتر)، I_0 و I_x به ترتیب شدت اولیه پرتو و شدت پرتو بعد از عبور از ضخامت x ماده است. در رابطه‌ی (۲)، با داشتن ضرایب μ و شدت اولیه‌ی اشعه (I_x) می‌توان دو پارامتر مهم دیگر که در تعریف مواد حفاظ اشعه کاربرد دارند را بدست آورد: ضخامت نیم جذب یا لایه‌ی نیم کننده (^{5}HVL) و لایه‌ی یک دهم کننده (^{6}TVL). لایه‌ی نیم کننده بیانگر ضخامتی از ماده است که مقدار اشعه در طی آن به نصف کاهش پیدا می‌کند و لایه‌ی یک دهم کننده، ضخامتی از ماده است که مقدار اشعه به ۱۰ درصد مقدار اولیه می‌رسد. با اعمال تعاریف ارائه شده در رابطه‌ی (۲) مقادیر TVL و HVL بر حسب سانتیمتر به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

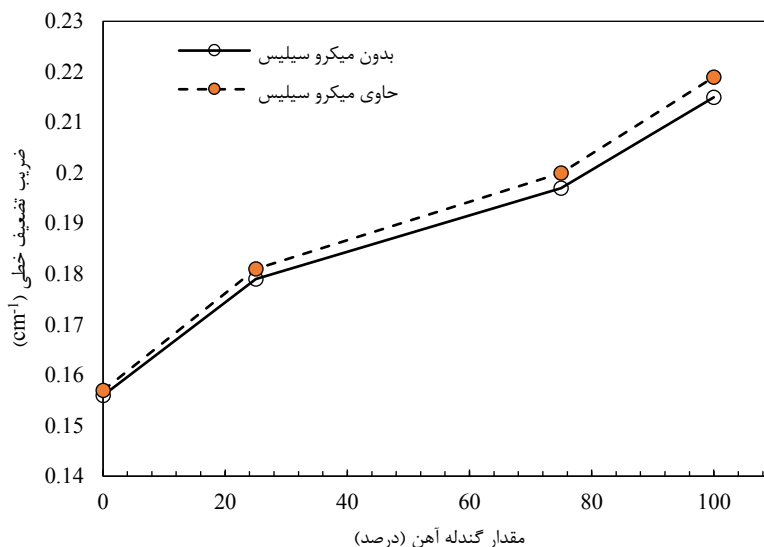
4. Linear Attenuation Coefficient (LAC)
5. Half-Value Layer
6. Tenth-Value Layer

1. Helmand and Saini
2. Tayeh and Saffar
3. Ouda and Abdelgader



شکل ۷. مقدار اشعه عبوری از نمونه ها نسبت به نمونه مرجع

Fig. 7. Amount of radiation transmitted through the samples relative to the control sample



شکل ۸. اثر مقدار گندله آهن و میکروسیلیس بر ضریب تضعیف خطی

Fig. 8. Effect of iron pellet and micro silica content on linear attenuation coefficient

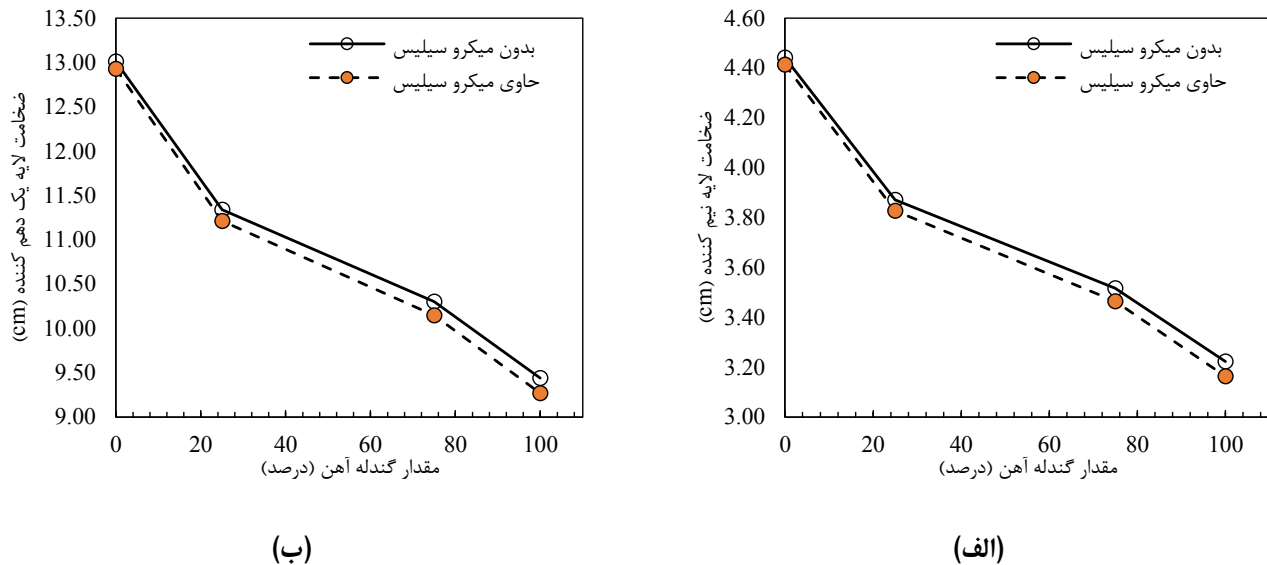
شده است. از شکل ۸ مشخص است که میکروسیلیس به صورت جزئی موجب افزایش ضریب تضعیف خطی بتن سنگین و بهبود جزئی خاصیت حفاظتی آن در برابر اشعه گاما شده است. با افزایش مقدار گندله آهن ضریب μ افزایش یافته است به طوری که مقدار آن برای نمونه فاقد میکرو سیلیس از ۰/۱۵۶ برای نمونه‌ی شاهد به ۰/۲۱۵ برای نمونه حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌ی آهنی افزایش یافته که بیانگر افزایش ۳۸ درصدی ضریب μ است. برای نمونه حاوی میکروسیلیس مقدار افزایش ضریب μ نسبت به

$$HVL : X_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\mu} \quad (\text{الف})$$

$$TVL : X_{\frac{1}{10}} = \frac{2.03}{\mu} \quad (\text{ب})$$

(۳)

مقادیر بدست آمده برای ضریب تضعیف خطی نمونه‌ها بر حسب مقدار گندله آهن در شکل ۸ و مقادیر HVL و TVL در شکل ۹ نشان داده



شکل ۹. اثر مقدار گندله آهن و میکرو سیلیس بر (الف) - ضخامت لایه نیم کننده، (ب) - ضخامت لایه یک دهم کننده

Fig. 9. Effect of iron pellet and micro silica amount on: (a) Half-Value Layer, (b) Tenth-Value Layer

۴ - نتیجه گیری

در این پژوهش، چگالی، مقاومت فشاری و درجه حفاظت در برابر اشعه گاما برای بتن حاوی درصدهای مختلف گندله آهن و همچنین ۱۰ درصد میکرو سیلیس مورد ارزیابی قرار گرفت و به صورت کلی نتایج زیر به دست آمد:

- ضریب تضعیف خطی بتن در برابر اشعه گاما با افزایش مقدار گندله آهن افزایش یافته است و ساخت بتن با ترکیب کامل از سنگدانه های گندله آهن موجب افزایش ضریب تضعیف خطی تا ۴۰ درصد شده است. ضخامتی از بتن که موجب کاهش اشعه گاما تا ۱۰ درصد می شود (TVL) نسبت به نمونه شاهد تا ۳۰ درصد کاهش یافته که بیانگر استفاده از ضخامت کمتر جهت رسیدن به حفاظت اشعه مطلوب در بتن حاوی گندله آهن است.
- با افزایش درصد سنگدانه گندله آهن در بتن، مقاومت فشاری تقریباً ثابت مانده است ولی با جایگزینی کل سنگدانه با گندله، مقاومت فشاری به صورت جزئی دچار کاهش شده است. در بتن حاوی میکرو سیلیس، با افزایش گندله آهن، مقاومت فشاری افزایش یافته است.
- استفاده از میکروسیلیس اثر چندانی بر افزایش خاصیت حفاظت در برابر اشعه گاما بتن نداشته است ولی به دلیل افزایش مقاومت فشاری بتن، باعث رفع شدن اثرات کاهش سنگدانه گندله آهن بر مقاومت فشاری شده است. بنابراین با استفاده همزمان از گندله و میکرو سیلیس می توان همزمان هم عملکرد مکانیکی و هم خواص مرتبط با حفاظت در برابر اشعه برای بتن

نمونه مرجع برای نمونه های حاوی ۲۵، ۷۵ و ۱۰۰ درصد گندله آهن، برابر با ۱۵، ۲۷ و ۳۹ درصد بوده است که بیانگر اثر ناچیز میکرو سیلیس بر ضریب میرایی خطی در بتن حاوی سنگدانه های آهنی بوده است.

خواص گزارش شده برای حفاظت اشعه بتن حاوی سنگدانه همانطور که در مقدمه بیان شد وابسته به شدت اشعه ورودی است. در میان تحقیقات انجام گرفت با شدت یکسان با این تحقیق می توان به موارد زیر اشاره کرد که تا حدودی دارای پراکندگی می باشد.

نتایج ارائه شده توسط پاپاکریستوفرو و پاپایانی^۱ نشان دهنده افزایش ۱۵ درصدی ضریب تضعیف خطی برای بتن سنگین با سنگدانه تمام آهنی است [۳۰]. در آزمایشات انجام گرفته توسط اوودا و عبدالقادر^۲ افزایش ضریب تضعیف خطی تا ۵۰ درصد نسبت به نمونه مرجع گزارش شد [۲۸].

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های ۹ و ۱۰ مشخص است که برای شدت اشعه ورودی استفاده شده در این تحقیق، ضخامت لایه نیمه کننده از ۴/۴ سانتی متر به حدود ۳/۲ سانتی متر کاهش یافته است، این مقدار برای ضخامت لایه یک دهم کننده از ۱۳ سانتی متر به حدود ۹/۴ سانتی متر کاهش یافته است که بیانگر دست یافتن به حفاظت اشعه در ضخامتی برابر با ۷۰ درصد ضخامت بتن معمولی است.

1. Papachristoforou and Papayianni
2. Ouda and Abdelgader

سنگین را بهبود بخشید.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

$D_{T,R}$ دوز جذبی، grY

$H_{T,R}$ دوز معادل، grY

I_0 شدت اولیه پرتو، μSiv

I_x شدت پرتو بعد از عبور از جسم، μSiv

W_R ضریب توزین پرتو

x ضخامت قطعه، cm

علائم یونانی

μ

منابع

- [6] Y. Zhou, X. Chen, Y. Zhan, S. Wang, J. Xu, Review of the transmittance effects and long-term radiation mechanisms of γ on heavy concrete, *Progress in Nuclear Energy*, 175 (2024) 105353.
- [7] A.H. Abdalsalam, M. Sayyed, T.A. Hussein, E. Şakar, M.H.A. Mhareb, B.C. Şakar, B. Alim, K.M. Kaky, A study of gamma attenuation property of UHMWPE/Bi2O3 nanocomposites, *Chemical Physics*, 523 (2019) 92-98.
- [8] B. Oto, A. Gür, E. Kavaz, T. Çakır, N. Yaltay, Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes, *Progress in Nuclear Energy*, 92 (2016) 71-80.
- [9] Y. Esen, Z.M. Doğan, Investigation of usability of limonite aggregate in heavy-weight concrete production, *Progress in Nuclear Energy*, 105 (2018) 185-193.
- [10] M.A. González-Ortega, S. Cavalaro, A. Aguado, Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties of concrete, *Construction and building materials*, 74 (2015) 169-175.
- [11] A. Karami, A. Abbasi Dezfooli, S.A. Hosseini, Mechanical Properties and Permeability of Heavyweight Concrete Containing Iron Pellets, Crumb Iron, and Microsilica, *Concrete Research*, 15(3) (2022) 45-55.
- [12] S.E. Milasi, D. Mostofinejad, H. Bahmani, Improving the resistance of ultra-high-performance concrete against nuclear radiation: Replacing cement with Barite, hematite, and lead powder, *Developments in the Built Environment*, 15 (2023) 100190.
- [13] A. Mesbahi, H. Ghiasi, Shielding properties of the ordinary concrete loaded with micro-and nano-particles against neutron and gamma radiations, *Applied Radiation and Isotopes*, 136 (2018) 27-31.
- [14] M.A. Khalaf, C.B. Cheah, M. Ramli, N.M. Ahmed, [1] F. Ikraiam, J. Ali, A. El-Latif, A. Abd ELazziz, Effect of steel fiber addition on mechanical properties and gamma-ray attenuation for ordinary concrete used in El-Gabal El-Akhdar area in Libya for radiation shielding purposes, (2009).
- [2] M. Awadeen, M. Amin, R.H. Bakr, A.M. Tahwia, Mechanical properties, attenuation coefficient, and microstructure of ultra high-performance heavyweight concrete for radiation shielding applications, *Journal of Building Engineering*, 82(1) (2024) 108395.
- [3] M. Kharita, M. Takeyeddin, M. Alnassar, S. Yousef, Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics, *Progress in Nuclear energy*, 50(1) (2008) 33-36.
- [4] M.H. Khan, Z. QiuHong, M.A. Sikandar, B. Khan, H. Zhu, M.S. Khan, Evaluation of mechanical strength, gamma-ray shielding characteristics, and ITZ microstructural properties of heavyweight concrete using nano-silica (SiO₂) and barite aggregates, *Construction and Building Materials*, 419 (2024) 135483.
- [5] I.M. Nikbin, R. Mohebbi, S. Dezhmanpanah, S.

- Alhassan, R.S. Rashid, M.F. Yasin, K. Bayagoob, S.A. Onaizi, Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and the impact of radiation on concrete properties, *Journal of Building Engineering*, (2024) 110800.
- [23] ASTM, ASTM C192/c192m: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, in, American Standard and Testing Material, West Conshohocken, 2019.
- [24] M. Alwaeli, J. Nadziakiewicz, Recycling of scale and steel chips waste as a partial replacement of sand in concrete, *Construction and Building Materials*, 28(1) (2012) 157-163.
- [25] M.J. Miah, M.K. Ali, S.C. Paul, A. John Babafemi, S.Y. Kong, B. Šavija, Effect of recycled iron powder as fine aggregate on the mechanical, durability, and high temperature behavior of mortars, *Materials*, 13(5) (2020) 1168.
- [26] B.A. Tayeh, D.M. Al Saffar, Utilization of waste iron powder as fine aggregate in cement mortar, *journal of engineering research and technology*, 5(2) (2018).
- [27] P. Helmand, S. Saini, Mechanical properties of concrete in presence of Iron filings as complete replacement of fine aggregates, *Materials Today: Proceedings*, 15 (2019) 536-545.
- [28] A.S. Ouda, H.S. Abdelgader, Assessing the physical, mechanical properties, and γ -ray attenuation of heavy density concrete for radiation shielding purposes, *Geosystem Engineering*, 22(2) (2019) 72-80.
- [29] C.C. Ban, M.A. Khalaf, M. Ramli, N.M. Ahmed, M.S. Ahmad, A.M.A. Ali, E.T. Dawood, F. Ameri, Modern heavyweight concrete shielding: Principles, industrial applications and future challenges; review, *Journal of Building Engineering*, 39 (2021) 102290.
- [30] M. Papachristoforou, I. Papayianni, Radiation shielding and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) produced with EAF slag aggregates, *Radiation Physics and Chemistry*, 149 (2018) 26-32.
- A.M.A. Al-Asady, A.M.A. Ali, A. Al-Shwaiter, W. Tangchirapat, Engineering and gamma-ray attenuation properties of steel furnace slag heavyweight concrete with nano calcium carbonate and silica, *Construction and Building Materials*, 267 (2021) 120878.
- [15] M.E. Mahmoud, A.M. El-Khatib, M.S. Badawi, A.R. Rashad, R.M. El-Sharkawy, A.A. Thabet, Recycled high-density polyethylene plastics added with lead oxide nanoparticles as sustainable radiation shielding materials, *Journal of cleaner production*, 176 (2018) 276-287.
- [16] M. Rashad, H. Tekin, H.M. Zakaly, M. Pyshkina, S.A. Issa, G. Susoy, Physical and nuclear shielding properties of newly synthesized magnesium oxide and zinc oxide nanoparticles, *Nuclear Engineering and Technology*, 52(9) (2020) 2078-2084.
- [17] G. Tyagi, A. Singhal, S. Routroy, D. Bhunia, M. Lahoti, Radiation Shielding Concrete with alternate constituents: An approach to address multiple hazards, *Journal of hazardous materials*, 404 (2021) 124201.
- [18] N. Damla, U. Çevik, A. Kobya, A. Çelik, N. Çelik, R. Van Grieken, Radiation dose estimation and mass attenuation coefficients of cement samples used in Turkey, *Journal of Hazardous Materials*, 176(1-3) (2010) 644-649.
- [19] M.M. Al-Humaiqani, A.B. Shuraim, R.R. Hussain, γ -Radiation shielding properties of high strength high performance concretes prepared with different types of normal and heavy aggregates, *Asian Trans. Eng.*, 3(2) (2013) 18-28.
- [20] J. Kim, D. Seo, B.C. Lee, Y.S. Seo, W.H. Miller, Nano TiO_2 dispersed gamma radiation shielding materials, *Advanced engineering materials*, 16(9) (2014) 1083-1089.
- [21] J. Qiao, X. Zhang, D. Xu, L. Kong, L. Lv, F. Yang, F. Wang, W. Liu, J. Liu, Design and synthesis of TiO_2/Co /carbon nanofibers with tunable and efficient electromagnetic absorption, *Chemical Engineering Journal*, 380 (2020) 122591.
- [22] A.M. Onaizi, M. Amran, W. Tang, N. Betoush, M.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. A. Hosseini, A. Karami, M. Bagheri, A. Yarinassab, Shielding Properties of Heavy-Weight Concrete Containing Different Amounts of Iron Pellets, Amirkabir J. Civil Eng., 57(3) (2025) 409-426.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23444.8162](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23444.8162)



