

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

سید عباس حسینی<sup>۱\*</sup>، عبدالله کرمی<sup>۲</sup>، منصور باقری<sup>۳</sup>، آمنه یاری نسب<sup>۴</sup>

۱- دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران، a.hosseini@yu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران، a.hosseini@yu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی معدن، عمران، شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران، mnsrbagheri@birjandut.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ayarinasb@gmail.com

## چکیده

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 هر چند در خاصیت حفاظتی بتن سنگین تاثیر کمی داشته ولی موجب بهبود مقاومت فشاری بتن سنگین تا ۳۵ درصد شده است.

## کلمات کلیدی

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

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 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> ضریب تضعیف خطی بتن ( $\mu$ ) 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<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> از پودر سنگ آهن تولید شده و به عنوان ماده‌ی اولیه در کوره‌های آهن‌گذاری 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 کسناترته، 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

<sup>1</sup> Oto et al.

<sup>2</sup> Esen and Dogan

<sup>3</sup> Jonior et al.

<sup>4</sup> González et al.

<sup>5</sup> Iron ore pellets

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 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<sup>۱</sup> 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.

## 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.

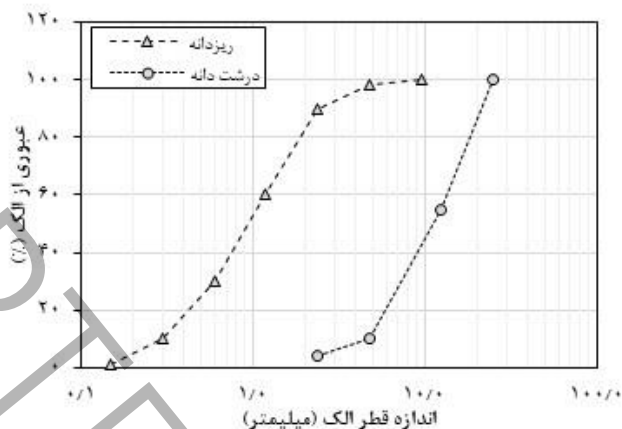
### ۲-۲- مواد و مصالح

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

1 Khalaf et al.

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 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 <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	P	S	ترکیب
۶۸	۳/۵	۰/۷	۱/۵	۱/۶	۱/۲	۰/۰۷	۰/۰۱	مقدار



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

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

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. میکروسلیس 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.

جدول ۲: مشخصات سیمان نوع ۱ مورد استفاده در تحقیق

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

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

جدول ۳: مشخصات پودر میکروسیلیس

Table 3: Micro silica powder specifications

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

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

### ۳-۲- 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

۲۵	۲۵	۳۳۶	۳۳۶	۷۲۰	۶۴۵	۴۰	۳۶۰	۱۸۰	H25M
۷۵	۷۵	۱۰۵۰	۱۰۵۰	۲۴۰	۲۱۵	-	۴۰۰	۱۸۰	H75
۷۵	۷۵	۱۰۵۰	۱۰۵۰	۲۴۰	۲۱۵	۴۰	۳۶۰	۱۸۰	H75M
۷۵	۱۰۰	۱۰۵۰	۱۳۵۰	۲۴۰	-	-	۴۰۰	۱۸۰	H100
۷۵	۱۰۰	۱۰۵۰	۱۳۵۰	۲۴۰	-	۴۰	۳۶۰	۱۸۰	H100M

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. میکروسلیس 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 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].

#### ۴-۲- 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.



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)



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.

### ۳- نتایج آزمایش‌ها و بحث

#### ۳-۱- مقاومت فشاری و چگالی

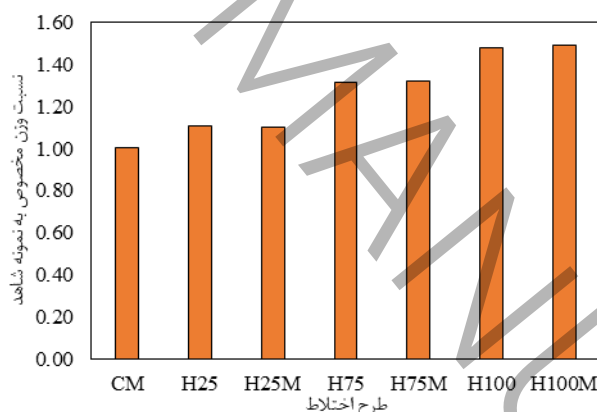
در جدول ۶ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و چگالی بتن سنگین آورده شده است. نتایج ارائه شده، میانگین ۳ آزمایش انجام شده بر روی هر طرح اختلاط می‌باشد. در شکل ۵ نسبت چگالی نمونه‌ها به نمونه مرجع نشان داده شده است. از نتایج ارائه شده در جدول ۶ و شکل ۵ مشخص است که با افزایش مقدار گندله و پوسته آهنی در بتن، مقدار چگالی افزایش یافته است به طوری که 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 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، تایه و صفار افزایش ۱۰ درصدی چگالی به واسطه جایگزینی ۳۰ درصد از سنگدانه معمولی با خرده آهن را گزارش کرده‌اند [۲۶].

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 <sup>3</sup> )
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

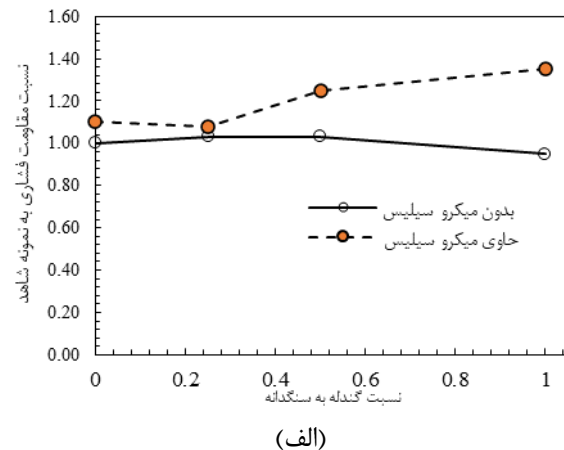
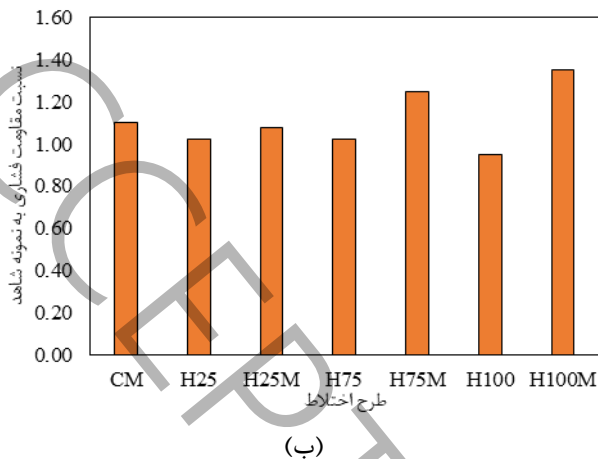


شکل ۵: نسبت جرم مخصوص نمونه‌ها به جرم مخصوص نمونه شاهد

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

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 و حتی در برخی موارد مقاومت فشاری مقدار جزئی دچار کاهش خواهد گردید. این نتیجه با نتایج سایر محققان که اضافه کردن سنگدانه های 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، میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت از ۳۸ به ۵۴ مگاپاسکال شده است که بیانگر افزایش ۳۵ درصدی در مقاومت فشاری است.





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)

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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> نیز گزارش شده است [۲۶]. اوودا و عبدالقادر<sup>۳</sup> کاهش مقاومت فشاری و کششی در بتن با درصد جایگزینی بیشتر از ۵۰ درصد سنگدانه با سنگدانه سنگین را گزارش کرده‌اند [۲۸].

### ۲-۳- 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:

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

<sup>1</sup> Helmand and Saini

<sup>2</sup> Tayeh and Saffar

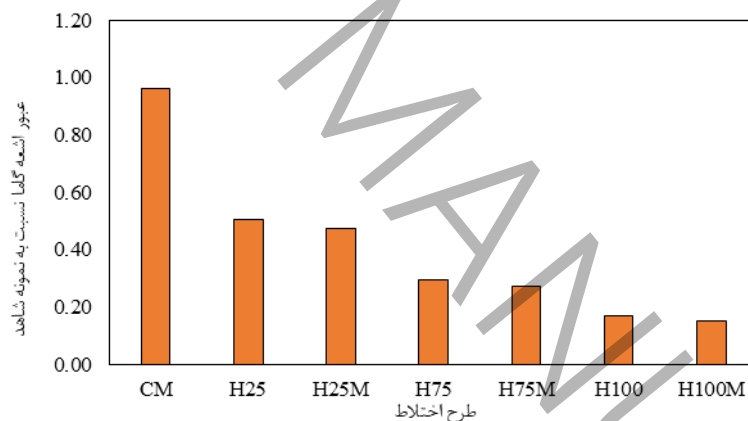
<sup>3</sup> Ouda and Abdelgader

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.

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



شکل ۷: مقدار اشعه عبوری از نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع

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

یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی قدرت حفاظت در برابر اشعه، ضریب تضعیف خطی<sup>۱</sup> ( $\mu$ ) است. این ضریب بیانگر کسری از فوتون‌ها است که در عبور از یک سانتیمتر ماده کاهش می‌یابند و واحد آن  $\text{cm}^{-1}$  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  $\mu$  و شدت اولیه‌ی اشعه ( $I_x$ ) می‌توان دو پارامتر مهم دیگر که در تعریف مواد حفاظ اشعه کاربرد دارند

1 Linear Attenuation Coefficient (LAC)

را بدست آورد: ضخامت نیم جذب یا لایه‌ی نیم کننده ( $HVL^1$ ) و لایه‌ی یک دهم کننده ( $TVL^2$ ). لایه‌ی نیم کننده بیانگر ضخامت از ماده است که مقدار اشعه در طی آن به نصف کاهش پیدا می‌کند و لایه‌ی یک دهم کننده، ضخامت 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:

$$HVL : X_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\mu} \quad \text{۳-الف)}$$

$$TVL : X_{\frac{1}{10}} = \frac{2.03}{\mu} \quad \text{۳-ب)}$$

مقادیر بدست آمده برای ضریب تضعیف خطی نمونه‌ها بر حسب مقدار گندله‌ی آهن در شکل ۸ و مقادیر HVL و TVL در شکل ۹ نشان داده 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 گندله‌ی آهن ضریب  $\mu$  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  $\mu$  است. برای نمونه حاوی میکروسیلیس مقدار افزایش ضریب  $\mu$  نسبت به 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 سنگدانه‌ی 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 می‌توان به موارد زیر اشاره کرد که تا حدودی دارای پراکندگی می‌باشد. نتایج ارائه شده توسط پاپا کریستوفورو و پاپایانی<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> افزایش ضریب تضعیف خطی تا ۵۰ درصد نسبت به نمونه مرجع گزارش شد [۲۸].

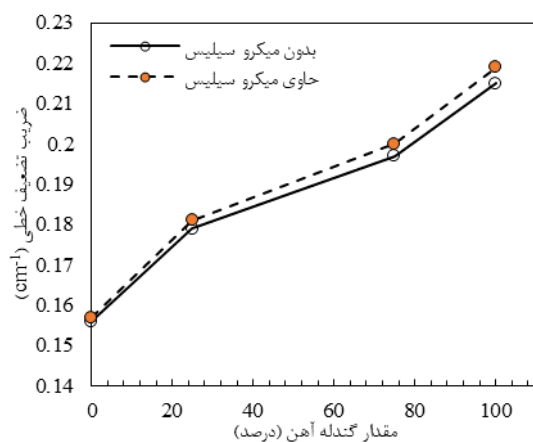
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های ۹ و ۱۰ مشخص است که برای شدت اشعه ورودی استفاده شده در این تحقیق، ضخامت لایه نیمه کننده از ۴/۴ سانتی‌متر به حدود ۳/۲ سانتیمتر کاهش یافته است، این مقدار برای ضخامت لایه یک دهم کننده از ۱۳ سانتی متر به حدود ۹/۴ سانتی‌متر کاهش یافته است که بیانگر دست یافتن به حفاظت اشعه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

1 Half-Value Layer

2 Tenth-Value Layer

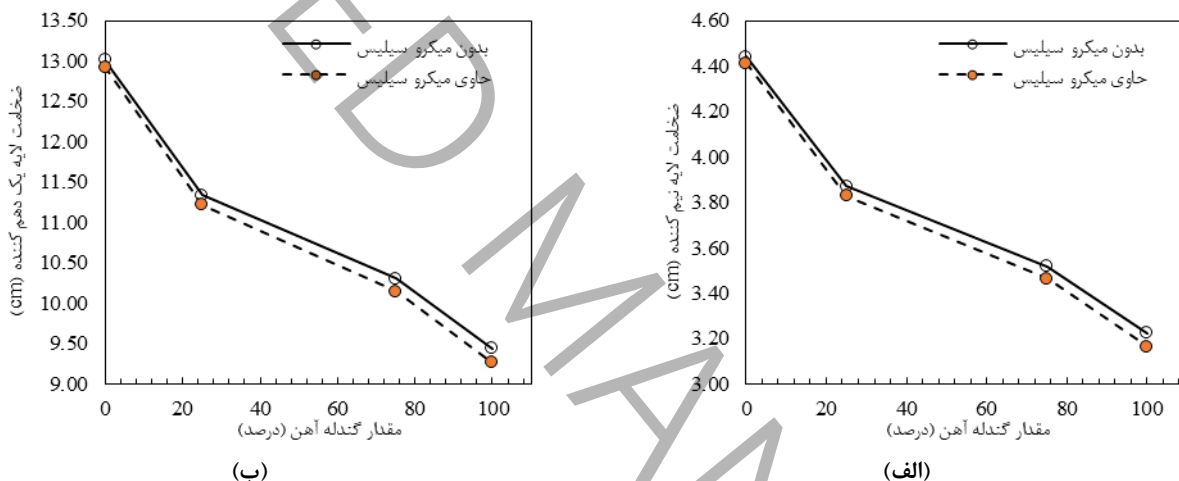
3 Papachristoforou and Papayianni

4 Ouda and Abdelgader



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



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 سنگدانه‌های گندله‌ی 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 گندله‌ی آهن است.

- با افزایش درصد سنگدانه گندله‌ی 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 گندله‌ی 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 کاهشی سنگدانه گندله آهن بر مقاومت فشاری شده است. بنابراین با استفاده همزمان از

گندله و میکرو سیلیس می‌توان همزمان هم عملکرد مکانیکی و هم خواص مرتبط با حفاظت در برابر اشعه برای بتن سنگین را بهبود بخشید.

#### ۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

$D_{T,R}$	دوز جذبی، gY
$H_{T,R}$	دوز معادل، gY
$I_0$	شدت اولیه پرتو، $\mu\text{SiV}$
$I_x$	شدت پرتو بعد از عبور از جسم، $\mu\text{SiV}$
$W_R$	ضریب توزین پرتو
$x$	ضخامت قطعه، cm

علائم یونانی

$\mu$

#### ۶- مراجع

- [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. Qihong, 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 ( $\text{SiO}_2$ ) and barite aggregates, Construction and Building Materials, 419 (2024) 135483.
- [5] I.M. Nikbin, R. Mohebbi, S. Dezhampanah, S. Mehdipour, R. Mohammadi, T. Nejat, Gamma ray shielding properties of heavy-weight concrete containing Nano- $\text{TiO}_2$ , Radiation Physics and Chemistry, 162 (2019) 157-167.
- [6] Y. Zhou, X. Chen, Y. Zhan, S. Wang, J. Xu, Review of the transmittance effects and long-term radiation mechanisms of  $\gamma$  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/ $\text{Bi}_2\text{O}_3$  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. Cavalero, 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. Ghiassi, 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, 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,  $\gamma$ -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-W 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<sub>2</sub>/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. 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. Šaviĳa, 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  $\gamma$ -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.

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

Seyed Abbas Hosseini<sup>a\*1</sup>, Abdollah Karami<sup>b</sup>, Mansour Bagheri<sup>c</sup>, Ameneh Yarinassab<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Yasouj, Iran.

<sup>b</sup> Department of civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

<sup>c</sup> Faculty of Mining, Civil and Chemical Engineering, Brijand University of Technology, Birjand, Iran.

<sup>d</sup> Civil and Environment Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

## 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%.

---

<sup>1</sup> Corresponding Author: Email: a.hosseini@yu.ac.ir



**KEYWORDS**

Heavyweight concrete, Gamma ray, Iron pellets, compressive strength, shielding.

ACCEPTED MANUSCRIPT