

## طراحی، ساخت و بررسی خواص بتن سنگین ساخته شده با سنگ آهن برای استفاده در حفاظ پرتوهای گاما

غلامرضا رئیس علی<sup>۱\*</sup>، نعمت اله بخشی<sup>۲</sup>، علی مهدوی<sup>۳</sup>،

فرهاد فروزانفر<sup>۴</sup>، ناهید حاجیلو<sup>۲</sup>، آنتیا عالی پور<sup>۲</sup>

۱- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی

۳- دانشگاه مازندران، دانشکده مهندسی عمران

۴- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد

### چکیده

هدف از این تحقیق، طراحی و ساخت بتن سنگین، با استفاده از سنگدانه‌های سنگین معادن ایران می‌باشد. مواد و نسبت‌های اختلاط این بتن سنگین به گونه‌ای انتخاب شده است که بتن حاصل در حالت تازه، دارای همگنی و کارایی مناسب، چگالی بالا و بدون جدا شدگی و آب انداختگی باشد و بتن سخت شده نیز خواص مکانیکی مناسب و ضریب تضعیف بالا، برای پرتوهای گاما را داشته باشد.

پس از انجام آزمایشات اولیه برای انتخاب سنگدانه‌های سنگین مناسب، چند طرح اختلاط با استفاده از سنگ آهن با دانه بندی‌های مختلف و مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی مختلف، ساخته شد و بهترین طرح اختلاط که بتن آن خواص مناسبی در حالت تازه و سخت شده داشت، انتخاب گردید. برای بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن سنگین ساخته شده، چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و تری، عدد بازگشت چکش اشمیت، سرعت پالس اولتراسونیک و جذب آب آن اندازه‌گیری شد. جهت بررسی خواص حفاظتی بتن‌ها، از کد کامپیوتری MCNP برای محاسبه ضریب تضعیف بتن‌ها در مقابل پرتوهای گامای چشمه‌های کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ استفاده شده است. همچنین ضریب تضعیف بتن‌ها با استفاده از یک کلیماتور و آشکار ساز پرتوهای گاما، اندازه‌گیری شده و مقادیر به دست آمده با مقادیر محاسبه شده مقایسه شده است.

برای بتن سنگین ساخته شده، چگالی  $3776 \text{ kg/m}^3$ ، مقاومت فشاری  $524 \text{ kg/cm}^2$ ، مقاومت کششی  $54/8 \text{ kg/cm}^2$  و ضریب تضعیف برای تابش‌های چشمه‌های گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ به ترتیب،  $0/22 \text{ cm}^{-1}$  و  $0/30 \text{ cm}^{-1}$  بدست آمده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که خواص مکانیکی بتن سنگین ساخته شده بهتر از بتن معمولی و چگالی و مقدار ضریب تضعیف بتن سنگین بسیار بیشتر از بتن معمولی است. بنابراین با دارا بودن این خواص، بتن سنگین ساخته شده، یک ماده مناسب برای حفاظ پرتوهای گاما می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** بتن سنگین، سنگ آهن، حفاظ، پرتوی گاما، ضریب تضعیف.

(\*) آدرس مکاتباتی: تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

e-mail: [graisali@aeoi.org.ir](mailto:graisali@aeoi.org.ir)

تلفن: ۰۲۱-۸۲۰۶۲۷۹۸

## ۱- مقدمه

جهت ساخت حفاظ در برابر پرتوهای گاما می‌توان از مصالح مختلفی استفاده کرد. بتن به عنوان یکی از رایج‌ترین این مصالح، به منظور حفاظت بیولوژیکی در نیروگاه‌های هسته‌ای، واحدهای پزشکی و صنعتی و مراکز تحقیقات هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصالح دیگر را نیز می‌توان برای این منظور به کار برد، ولی بتن معمولاً مقرون به صرفه‌ترین آنهاست [۱، ۲ و ۳]. دیوارهای حجیم ساخته شده از بتن معمولی، معمولاً به منظور حفاظ به کار برده می‌شوند. با این وجود، هنگامی که فضای قابل استفاده محدود باشد و در مواردی که با افزایش شدت و انرژی پرتوها نیاز به افزایش ضخامت حفاظ‌های موجود باشد، ضخامت بتن مورد نیاز را می‌توان با استفاده از بتن سنگین کاهش داد. بتن‌های سنگین، عموماً با استفاده از سنگدانه‌های طبیعی سنگین تولید می‌شوند [۱، ۴ و ۵]. وزن مخصوص این نوع بتن‌ها، در حدود  $3 \text{ kg/m}^3$  تا  $3840 \text{ kg/m}^3$  است، که حدود ۵۰ درصد بیشتر از وزن مخصوص بتن معمولی است [۱].

در حفاظ پرتوهای گاما، که قدرت نفوذ زیادی دارند، بازده عمل تضعیف، تقریباً متناسب با جرم ماده‌ای است که در مسیر تابش قرار گرفته است. مواد با چگالی بالاتر (مانند بتن سنگین)، در تضعیف پرتوهای گاما موثرتر می‌باشند و می‌توان با استفاده از مواد چگالتر ضخامت مورد نیاز برای حفاظ را کاهش داد. همچنین، خواص مکانیکی رضایت بخش، هزینه‌ی اولیه و نگهداری کم، سهولت و تنوع در ساخت و امکان قالب‌گیری با شکل‌های پیچیده نیز، از دیگر مزایای استفاده از بتن به عنوان حفاظ پرتوهاست. با توجه به ملاحظات ذکر شده، بتن ماده مناسبی برای حفاظ پرتوهای گاما می‌باشد [۱، ۲، ۵، ۶ و ۷].

طی بررسی‌هایی که انجام شد، در داخل کشور، تحقیقات منتشر شده‌ای در خصوص طراحی، ساخت و بررسی خواص فیزیکی، مکانیکی و هسته‌ای بتن سنگین، مشاهده نگردید. از جمله تحقیقاتی که در سال‌های اخیر، در سایر کشورها، در این خصوص انجام شده، در مراجع ۸، ۹ و ۱۰ بیان گردیده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای ساخت بتن سنگین و بتن معمولی از مصالح به شرح ذیل استفاده شده است: **الف) سنگدانه سنگین:** برای انتخاب سنگدانه سنگین مناسب، پس از شناسایی معادن سنگدانه‌های سنگین کشور، از ۲۰ معدن در استان‌های مختلف کشور، نمونه‌های سنگ آهن و باریت تهیه شد و پس از انجام آزمایشات مختلف بر اساس استانداردهای ASTM C637 [۱۱] و ASTM C33 [۱۱] و بررسی نتایج آنها، در نهایت سنگ آهن یکی از معادن به دلیل دارا بودن چگالی بالاتر و خواص مناسب‌تر برای ساخت بتن سنگین انتخاب گردید. نتایج برخی از آزمایشات این سنگدانه به شرح جدول ۱ می‌باشد.

**ب) سنگدانه معمولی:** برای ساخت بتن‌های معمولی، از سنگدانه‌های معمولی شرکت متوساک استفاده شده است. مشخصات این سنگدانه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ی سنگین انتخاب شده و سنگدانه‌ی معمولی (متوساک).

ردیف	اندازه و نوع سنگدانه ها						
	mm (۱۹-۱۲/۵)		mm (۴/۷۵-۱۲/۵)		mm (۰-۴/۷۵)		
	معمولی	سنگین	معمولی	سنگین	معمولی	سنگین	
۱	۴/۴۷	۲/۵۸	۴/۴۵	۲/۵۹	۴/۶۳	۲/۵۶	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )
۲	۰/۳۰	۱/۷۱	۰/۲۷	۱/۸۷	۰/۶۵	۲/۳۷	درصد جذب آب
۳	۱۲/۱	۱۴/۱	۱۲/۱	۱۴/۱	-----	-----	درصد سایش لس آنجلس
۴	-----	-----	-----	-----	۳/۴۷	۳/۳۶	مدول نرمی
۵	۲۳۰۹	۱۴۱۴	۲۲۵۱	۱۴۳۴	۲۶۹۷	۱۵۷۷	وزن مخصوص غیر متراکم (انبوهی) kg/m <sup>3</sup>
۶	۲۵۹۲	۱۵۶۸	۲۵۰۸	۱۵۳۹	۳۲۰۲	۱۶۷۹	وزن مخصوص متراکم (انبوهی) kg/m <sup>3</sup>

ج- مواد سیمانی: سیمان تپ ۲ شرکت آبیگ و دوده سیلیسی شرکت بتن شیمی به کار برده شد.

د- آب: آب آشامیدنی.

ه- فوق روان کننده: برای افزایش کارایی بتن، از فوق روان کننده ژلنیوم ۵۱ استفاده گردید.

برای طرح اختلاط بتن، از روش حجم مطلق استفاده شد. پس از در نظر گرفتن چند طرح اختلاط اولیه، طرح های آزمایشی با تغییر در دانه بندی سنگدانه ها، نوع و مقدار مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی ساخته شد و طرح اختلاط مناسب تر که خواص مورد نیاز را در حالت تازه وسخت شده دارا بود، به عنوان طرح اختلاط نهایی بتن سنگین انتخاب گردید و نمونه های نهایی بتن سنگین با استفاده از این طرح اختلاط ساخته شدند. همچنین آزمایشات فیزیکی و مکانیکی بتن ها شامل آزمایش چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و تری، عدد بازگشتی چکش اشمیت و سرعت امواج اولتراسونیک بر اساس استاندارد های ASTM [۱۱] و درصد جذب آب در بتن های سنگین و معمولی تعیین گردید. سپس با استفاده از کد کامپیوتری MCNP [۱۲]، ضریب تضعیف برای بتن های سنگین و معمولی ساخته شده برای چشمه های گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ محاسبه گردید. همچنین ضریب تضعیف این بتن ها در مقابل چشمه های گامای مذکور و با استفاده از کلیماتور و آشکار ساز گاما، اندازه گیری شد و نتایج بدست آمده برای بتن سنگین با بتن معمولی مقایسه گردید. نتایج بدست آمده از محاسبات و اندازه گیری ضرایب تضعیف نیز مورد مقایسه قرار گرفته است که در ادامه مقاله ارائه می گردند.

### ۳- نتایج

ابتدا با بررسی اثر دانه بندی سنگدانه های سنگین در خواص بتن تازه، جهت دستیابی به بتنی با چگالی و کارایی و همگنی مناسب و بدون جداشدگی، مقدار سنگدانه های سنگین ریز (ماسه mm ۰-۴/۷۵) ۵۵ درصد

و مقدار سنگدانه های درشت (شن ریز ۱۲/۵-۴/۷۵)، ۱۸ درصد و مقدار سنگدانه های درشت (شن درشت ۱۹ mm-۱۲/۵)، ۲۷ درصد وزنی کل سنگدانه ها به دست آمد.

با استفاده از ساخت چند طرح اختلاط دیگر با مقدار مواد سیمانی ۳۲۵، ۳۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰ کیلوگرم در متر مکعب، اثر مقدار و نوع مواد سیمانی در خواص بتن سنگین در حالت تازه و سخت شده، بررسی گردید. در بتن هائی که فقط از سیمان (c) به عنوان ماده چسباننده استفاده شده بود، آب انداختگی شدیدی مشاهده شد. با جایگزین کردن مقداری از سیمان با دوده سیلیسی (s)، ضمن کنترل آب انداختگی بتن، چسبندگی مخلوط بتن نیز بهبود یافت. با مقدار مواد سیمانی (c+s)  $325 \text{ kg/m}^3$ ، بالاترین چگالی بدست آمد ولی با استفاده از حداکثر مقدار فوق روان کننده نیز کارایی مطلوبی برای بتن حاصل نشد. با استفاده از مقدار مواد سیمانی  $350 \text{ kg/m}^3$ ، خواص بتن در حالت تازه و سخت شده مناسب بود. لذا این مقدار مواد سیمانی برای ساخت بتن انتخاب گردید. با مقدار مواد سیمانی  $500 \text{ kg/m}^3$  و  $550 \text{ kg/m}^3$ ، کاهش زیادی در چگالی بتن مشاهده گردید. با بررسی اثر چند نسبت آب به مواد سیمانی (w/(c+s)) مختلف، در نهایت نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ برای ساخت بتن سنگین، مناسب تشخیص داده شد. بنابراین با مقدار مواد سیمانی  $350 \text{ kg/m}^3$  و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵، نمونه های بتن سنگین و بتن معمولی ساخته شدند. مشخصات طرح اختلاط این بتن ها به شرح جدول ۲ می باشد. پس از ساخت و عمل آوری نمونه های نهایی بتن سنگین و معمولی، آزمایشات خواص فیزیکی و مکانیکی روی آنها انجام گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- طرح اختلاط بتن های سنگین و معمولی (مقادیر مصالح بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب).

فوق روان کننده	ماسه	شن ریز	شن درشت	دوده سیلیسی	سیمان	w/(c+s)	نام نمونه بتن
۵/۱۸۴	۱۷۸۹	۵۶۵	۸۵۱	۱۷/۵	۳۳۲/۵	۰/۴۵	بتن سنگین
۰/۸۰۰	۹۷۲	۳۲۳	۴۸۴	۱۷/۵	۳۳۲/۵	۰/۴۵	بتن معمولی

جدول ۳- نتایج آزمایش های خواص فیزیکی و مکانیکی بتن های معمولی و سنگین.

ردیف	نام آزمایش	استاندارد یا روش	بتن سنگین	بتن معمولی
۱	چگالی بتن در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) ( $\text{kg/m}^3$ )	ASTM C642	۳۷۷۶	۲۳۴۱
۲	چگالی بتن در حالت خشک ( $\text{kg/m}^3$ )	ASTM C642	۳۶۶۲	۲۱۹۹
۳	مقاومت فشاری ۲۸ روزه ( $\text{kg/cm}^2$ )	BS 1881 Part 4	۵۲۴	۴۶۲
۴	مقاومت کششی (روش برزیلی) ( $\text{kg/cm}^2$ )	ASTM C496	۵۴/۸	۴۵/۷
۵	عدد بازگشت چکش اشmitt	ASTM C805	۳۹/۴	۳۵/۴
۶	سرعت امواج اولتراسونیک در بتن (km/s)	ASTM C597	۴/۸۰	۴/۵۵
۷				

همچنین برای انجام محاسبات با کد کامپیوتری MCNP، آنالیز شیمیایی این بتن‌ها تعیین شد که مقادیر مربوطه در جدول ۴ آورده شده است. با استفاده از محاسبات با کد کامپیوتری MCNP مقادیر ضرایب تضعیف بتن سنگین و معمولی محاسبه گردید. سپس، مقدار ضریب تضعیف این بتن‌ها، برای چشمه‌های گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از انجام محاسبات و اندازه‌گیری ضرایب تضعیف این بتن‌ها، در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- ترکیبات شیمیایی نمونه‌های نهائی بتن معمولی و بتن سنگین.

نوع بتن	درصد وزنی ترکیبات شیمیایی بتن											
	Ca	Al	Si	Mg	P	S	K	Ti	Fe	Ba	H	O
بتن معمولی	۱۲/۹۵	۵/۰۵	۲۴/۱۲	۱/۲۸	۰/۱۸	۰/۵۵	۲/۴۵	۰/۴۴	۵/۵۹	۱/۱۰	۰/۳۶	۴۵/۴۰
بتن سنگین	۷/۳۲	۱/۳۱	۵/۶۱	۱/۱۰	۰/۷۵	۰/۴۵	۰/۲۰	۰/۲۲	۴۷/۵۷	۰/۰۷	۰/۲۲	۳۵/۱۹

جدول ۵- ضرایب تضعیف ( $\mu$ ) اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با کد MCNP برای بتن سنگین و معمولی در مقابل پرتوهای گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ (بر حسب  $\text{cm}^{-1}$ ) و مقایسه آنها.

نوع بتن	چگالی بتن خشک ( $\text{kg/m}^3$ )	$\mu$ بتن برای چشمه گامای Co-60			$\mu$ بتن برای چشمه گامای Cs-137		
		محاسباتی	آزمایش	درصد اختلاف	محاسباتی	آزمایش	درصد اختلاف
بتن معمولی	۲۱۹۹	۰/۱۳	۰/۱۴	۷/۷	۰/۱۷	۰/۱۹	۱۱/۸
بتن سنگین	۳۶۶۲	۰/۲۱	۰/۲۲	۴/۸	۰/۲۸	۰/۳۰	۷/۱

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پس از بررسی سنگدانه‌های سنگین ۲۰ معدن کشور، سنگ آهن یکی از معادن به عنوان سنگدانه ی سنگین مناسب انتخاب گردید. طرح اختلاط مناسب برای بتن سنگین، با مقدار مواد سیمانی  $350 \text{ kg/m}^3$  و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵، بدست آمد. بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی، بتن سنگین در جدول ۳ نشان می‌دهد، چگالی SSD و چگالی خشک بتن سنگین، به ترتیب ۳۷۷۶ و ۳۶۶۲ کیلوگرم بر متر مکعب است و به ترتیب، ۶۱٪ و ۶۷٪ بیشتر از بتن معمولی است که مشخصه خوبی برای بتن حفاظ پرتوهای گاما می‌باشد. مقاومت فشاری و کششی بتن سنگین به ترتیب،  $524 \text{ kg/cm}^2$  و  $54/8 \text{ kg/cm}^2$  و مدول الاستیسیته آن  $2/63 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد. عدد بازگشتی چکش اشمیت ۳۹/۴ و سرعت امواج اولتراسونیک  $4/80 \text{ km/s}$  در بتن سنگین به دست آمد. مقایسه نتایج کلیه آزمایشات فوق، با نتایج بدست آمده در جدول ۳ برای بتن معمولی، نشان می‌دهد که در کلیه آزمایشات فیزیکی و مکانیکی، بتن سنگین وضعیت مناسب تری نسبت به بتن معمولی دارد. همچنین جذب آب بتن سنگین ۰/۵۳ درصد تعیین شد که

این درصد جذب آب، به مراتب کمتر از جذب آب بتن معمولی است، بنابراین دوام آن در مقابل عوامل مهاجم محیطی بیشتر است. همچنین ضرایب تضعیف بتن سنگین، برای پرتوهای گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ با استفاده از محاسبات با کد کامپیوتری MCNP به ترتیب،  $0.21 \text{ cm}^{-1}$  و  $0.28 \text{ cm}^{-1}$  و با استفاده از آزمایش به ترتیب،  $0.22 \text{ cm}^{-1}$  و  $0.30 \text{ cm}^{-1}$  بدست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که توافق خوبی بین محاسبات و اندازه گیری وجود دارد. در شرایط مشابه، ضرایب تضعیف بتن معمولی نیز، محاسبه و اندازه گیری شد. مقایسه ضرایب تضعیف بتن سنگین و معمولی نشان داد که، برای چشمه های گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷، متوسط ضریب تضعیف محاسباتی و اندازه گیری شده برای بتن سنگین به ترتیب، ۵۹٪ و ۶۱٪ بیشتر از بتن معمولی است.

با توجه به نتایج آزمایشات خواص فیزیکی، مکانیکی و هسته ای، بتن سنگین برای ساخت حفاظ پرتوهای گاما از نظر سازه ای و خواص هسته ای مناسب تر از بتن معمولی است. بنابراین برای یک میزان تضعیف ثابت برای پرتوهای گاما با انرژی های متداول، می توان با استفاده از بتن سنگین، ضخامت حفاظ مورد نیاز را به مقدار قابل ملاحظه ای (حدود ۶۰ درصد) کاهش داد.

## ۵- مراجع

- ۱- منا و مونته ئیرو؛ رضانیانپور، علی اکبر، قدوسی، پرویز، گنجیان، اسماعیل؛ "تکنولوژی بتن پیشرفته"، چاپ اول، تهران، ۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۳).
- 2- S. Mclain , J. Martens; "Reactor Handbook", Vol. IV, Engineering , Second Edition; New York , London, Sydney(1964).
- 3- A. B. Chilton, J.K. Shultis, and R. E. Few; "Principles of Radiation Shielding", Prentice-Hall; Englewood Cliffs; NJ 07632 (1984).
- 4- American Concrete Institute; "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy weight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)", ACI Committee 211 , Appendix (4) (2002).
- 5- M. F. Kaplan ; "Concrete Radiation Shielding", Capt. (5,6,8,9), First Published, London; Longman Scientific (1989).
- 6- N. M. Schaeffer (ed.); "Reactor Shielding for Nuclear Engineers", TID-25951, National Technical Information Service; Spring Field; (1973).
- 7- R. G. Jaeger (ed.); "Engineering Compendium on Radiation Shielding", Vol. I: Shielding Fundamentals and Methods; Vol. II : Shielding Materials and Design ; Vol. III : Shield Design and Engineering; Springer-Verlag ; New York (1968-75).
- 8- Y. c. Kan, et al.; "Strength and Fracture Toughness of Heavy Concrete with Various Iron Aggregate Inclusions", Nuclear Engineering and Design (228), P. 119-127 (2004).
- 9- I. I. Bashter; "Calculation of Radiation Attenuation Coefficients for Shielding Concretes", Ann. Nucl. Energy, Vol. 24, No. 17, P. 1389-1401 (1997).
- 10- Akkurt, I, et al, " Radiation shielding of concretes containing different aggregates", Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 2, P. 153-157, (2006).
- 11- American Society for Testing and Materials; Significance of tests and properties of concrete and concrete making materials; ASTM Special Technical Publication. NO.169-B, (2002).
- 12 - J. F. Briesmeister, "MCNP-4C A General Monte Carlo N-Particle Transport Code System- Version 4C" , Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M, (2000).