محافظت در برابر پرتوهای گاما با کاربرد بتن سنگین حاوی سرباره سرب

علی یداللهی؛ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ مهندسی هسته‌ای
علی‌محمد آجرلو*؛ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ مهندسی عمران، آب و محیط زیست، گروه سازه و ژئوتکنیک
احمدرضا ذوالفقاری؛ دانشگاه شهید بهشتی،دانشکدهٔ مهندسی هسته‌ای

تاریخ: دریافت ۹۲/۱۱/۲۳ **پذیرش** ۹۳/۸/۱۹

چکیده

امروزه استفاده از بتن‌های سنگین به‌عنوان سپر محافظ در مقابل پرتوهای پرانرژی گاما بسیار متداول است. در تولید بتن‌های سنگین می‌توان از سرباره سرب به‌عنوان مصالح اولیه استفاده کرد. کاربرد سرباره سرب در تولید بلوک‌های بتنی موجب صرفه‌جویی در استفاده از منابع طبیعی و هم‌چنین کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از ذخیره‌سازی این ضایعات صنعتی می‌شود. در عین حال بتن تولیدی نیز به‌دلیل وجود عناصر فلزی سنگین با عدد اتمی بالا می‌تواند به‌عنوان یک حفاظ مؤثر در مقابل تابش پرتوهای گاما استفاده شود. تحقیق حاضر به‌بررسی امکان استفاده از سرباره سرب تولیدی در فرآیند بازیافت باتری‌های سربی به‌عنوان سنگ‌دانه در تولید بتن می‌پردازد. برای این منظور مقاومت مکانیکی و ضریب تضعیف پرتو گاما برای نمونه‌های سیمانی تهیه شده با جای‌گزینی ٤٠ تا ٦٠ درصد سرباره سرب به‌جای سنگ‌دانه طبیعی اندازه‌گیری شده است. هم‌چنین تأثیر ١ تا ٥ درصد پودر سرب در زمان گیرش نمونه های سیمانی اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش میزان سرباره سرب، چگالی، مقاومت مکانیکی و ضریب تضعیف پرتو گاما برای نمونه‌های سیمانی افزایش قابل توجه پیدا می‌کند، ولی افزودن پودر سرب به خمیر سیمان زمان گیرش آن را شبیه سیمان‌های دیرگیر به تأخیر می‌اندازد. به‌طورکلی، ساخت بتن سرباره سرب مناسب با کم‌ترین ضخامت، هزینه ساخت حفاظ را کاهش داده و بیش‌ترین میزان تضعیف را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بتن سنگین، سرباره سرب، پرتو گاما، مقاومت مکانیکی، ضریب تضعیف

* **نویسنده مسئول** am_ajorloo@sbu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

مقدمه

تماس با مقدار بیش از حد مجاز تابش‌های هسته‌ای می‌تواند سبب ایجاد آسیب‌های جدی و غیرقابل درمان در افراد شود. به‌همین دلیل محافظت همه‌جانبه از مردم و محیط‌زیست در مقابل این تابش‌ها ضروری است و سپرهای محافظ باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که دز معادل دریافت شده به‌وسیلهٔ هر فرد از ماکزیمم دز مجاز تجاوز نکند. برای طراحی حفاظ در مقابل پرتوهای گاما در مرحلهٔ اول داشتن اطلاعات کافی در خصوص این پرتو، مکانیزم واکنش آن با مواد و هم‌چنین نحوه تضعیف آن ضروری به‌نظر می‌رسد از این رو، توضیحاتی در این زمینه ارائه می‌شود.

۱. پرتو گاما و مکانیزم واکنش آن با مواد

پرتو گاما پرتوی یونیزان و از جنس امواج الکترومغناطیسی است که از هسته‌های برانگیخته حاصل از تبدیل پرتوزا ساطع می‌شود. این پرتو انرژی بسیار زیاد دارد، به‌طوری‌که انرژی فوتون‌های آن حدود ۱۰۰۰۰ مرتبه بزرگ‌تر از انرژی فوتون‌های نور مرئی است [۱]. معمولاً اشعهٔ گاما که از هسته‌های رادیواکتیو صادر می‌شود انرژی در حدود ۰/۱ تا ۷ مگاالکترون ولت دارد اما اغلب انرژی کم‌تر از ٤ مگاالکترون ولت دارد.

پرتو گاما هنگام عبور از ماده با اتم‌های آن برهم‌کنش داده و در اثر این برهم‌کنش شدت فوتون‌ها کاهش یافته در نتیجه تعداد فوتون‌ها کاهش می‌یابد. ولی در مقابل با حذف شدن فوتون‌های کم انرژی، انرژی متوسط دسته پرتو افزایش می‌یابد. میزان تضعیف فوتون‌ها در ماده به‌صورت نمایی است و از رابطهٔ (۱) تبعیت می‌کند :

$$N = N_0 e^{-\mu t} \qquad \text{رابطهٔ (۱)}$$

که در این‌جا : N_0 تعداد فوتون‌های اولیه، N تعداد فوتون‌های باقی‌مانده، t ضخامت مادهٔ جاذب و μ ضریب تضعیف هستند.

سه مکانیزم اصلی که برای تضعیف فوتون‌ها اهمیت دارند، فرآیند جذب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و ایجاد زوج یون هستند. در فرآیند جذب فوتوالکتریک و ایجاد زوج یون هر چه عدد اتمی عنصر هدف بیش‌تر باشد احتمال انجام واکنش افزایش می‌یابد اما در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

پراکندگی کامپتون، احتمال انجام واکنش به عدد اتمی ماده جاذب بستگی ندارد ولی به هر حال تحت تأثیر انرژی پرتو و دانسیته ماده جاذب است.

۲. ساختار طراحی حفاظ برای پرتوهای گاما

حفاظ تابش‌های هسته‌ای به‌منظور جذب تمام پرتوهای اولیه و ثانویه منتشر شده از یک منبع، طراحی و ساخته می‌شود. در طراحی حفاظ در مقابل فوتون‌ها، بازدهٔ عمل تضعیف، تقریباً متناسب با جرم ماده‌ای است که در مسیر پرتو قرار گرفته است، از این رو، مواد مختلف با جرم یک‌سان در مسیر پرتو، قابلیت حفاظتی یک‌سانی در مقابل اشعهٔ ایکس و گاما دارند [۲]. بتن، با توجه به قابلیت دسترسی زیاد، ارزان بودن، مقاومت مکانیکی زیاد و خواص تضعیف‌کنندگی آن همواره به‌عنوان حفاظی مناسب در برابر پرتوهای پرانرژی گاما استفاده شده است و حفاظ‌های بتنی در راکتورهای هسته‌ای، اتاق رادیوتراپی مگاولتاژ و مراکز پسماندداری هسته‌ای کاربرد بسیار زیادی دارند. بتن به‌عنوان ماده‌ای مناسب برای تضعیف پرتوهای گاما، انواع مختلفی دارد که تفاوت آن‌ها ناشی از اختلاف در عناصر تشکیل‌دهندهٔ بتن مانند سیمان، سنگ‌دانه، آب و مواد افزودنی است. معمولاً اگر محدودیت فضا در حفاظ‌گذاری مطرح نباشد، بتن معمولی محافظ خوبی برای پرتوهای گاما خواهد بود ولی از آن‌جاکه ضخامت بتن رابطهٔ مستقیم با میزان تضعیف پرتو دارد و دیوارهای ضخیم بتنی هزینه زیادی در برداشته و فضای زیادی نیز اشغال می‌کنند، استفاده از بتن‌های با چگالی زیاد برای کاهش ضخامت دیوارها ترجیح داده می‌شود. در واقع کارایی حفاظ بتنی در برابر پرتوهای گاما تقریباً با جرم مخصوص آن متناسب است و بتن سنگین با چگالی بیش‌تر، حفاظ مؤثرتری ایجاد می‌کنند. در ساخت بتن سنگین به‌جای شن و ماسه از افزودنی‌های سنگین مانند آهن، فولاد، سرب، باریت و ... استفاده می‌شود. عناصر سنگین از اتم‌های بزرگ که لایه‌های متعدد الکترون‌مداری دارند، تشکیل شده‌اند و اندازهٔ فیزیکی، تعداد الکترون‌های‌مداری و تأثیر میدان الکتروستاتیکی بین ذرات باردار به‌طور چشم‌گیری احتمال تضعیف پرتوهای فوتون با این عناصر سنگین را افزایش می‌دهد. چگالی بتن‌های سنگین در حدود ۳ تا ٦ کیلوگرم بر مترمربع است که حدود ۱/۵ تا ۲/۵ برابر چگالی بتن معمولی است. این نوع بتن‌ها نیز بسته به نوع سنگ‌دانه به‌کار رفته و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

چگالی آن‌ها رفتارهای متفاوتی را در مقابل تابش‌های مختلف از خود نشان می‌دهند که با توجه به نوع نیاز کاربر و شرایط حاکم برسیستم استفاده می‌شوند [۲].

۳. استفاده از سرباره سرب در ساخت بتن حفاظ تابش‌های هسته‌ای

سرب از فلزات اساسی و پرکاربرد در جهان است. از کل سرب تولیدی در اروپا حدود ۷۰ درصد آن در صنعت باتری‌سازی استفاده می‌شود از این‌رو باتری‌های فرسوده خودرو منبع اصلی سرب ثانویه به‌حساب می‌آیند. سالانه در حدود ۵۰ درصد از سرب مصرفی از طریق بازیافت قراضه‌ها و سرباره‌های باتری‌های فرسوده حاصل می‌گردد. این امر در سراسر نقاط دنیا از منابع مهم دست‌یابی به سرب خالص است [۳]. در فرآیند تولید سرب خالص از باتری‌های فرسوده، ناخالصی‌هایی که در بخش بالایی کوره باقی می‌مانند به نام سرباره شناخته می‌شوند. سرباره محصولی فرعی اجتناب‌ناپذیر در تولید سرب است که شامل اکسیدهای فلزی و غیرفلزی است. سرباره سرب دست اول به‌دست آمده از فرآیند ذوب باتری‌های فرسوده، خود حاوی درصد زیادی سرب است به‌همین دلیل دوباره آن‌را در کوره ذوب کرده تا سرب باقی‌مانده آن را جداسازی کنند. سرباره به‌دست آمده در این مرحله که به‌عنوان سرباره دست دوم شناخته می‌شود حاوی مقادیر بسیار کم‌تر سرب است. سرباره سرب تولیدی در فرآیند بازیافت باتری‌های فرسوده به‌دلیل وجود ترکیبات حاوی سرب و سایر فلزات سنگین به‌عنوان مواد خطرناک (سمی) طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به تولید روزافزون سرب از باتری‌های فرسوده، حجم زیاد سرباره تولیدی در این فرایند به مشکل مهم زیست‌محیطی تبدیل شده است. به‌همین دلیل حفاظت از محیط‌زیست با استفاده مجدد یا بازیابی سرباره‌های سرب امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

از آن‌جاکه اکسیدهای موجود در سرباره سرب با ترکیبات سیمان پرتلند شباهت‌هایی دارند، کاربرد سرباره به‌عنوان مصالح ساختمانی و در تولید بلوک‌های بتنی می‌تواند مؤثر واقع شود. علاوه بر این وجود عناصر فلزی سنگین با عدد اتمی بالا در سرباره باعث افزایش ضریب تضعیف پرتوهای گاما در بتن تولیدی می‌شود. بنا بر این جای‌گزینی سرباره سرب به‌عنوان افزودنی و یا سنگ‌دانه در تولید بتن از نقطه نظر زیست‌محیطی، اهمیت بسیار زیادی دارد و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

این امر موجب صرفه‌جویی در استفاده از منابع طبیعی و هم‌چنین کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از ذخیره‌سازی این ضایعات صنعتی می‌شود. در عین حال بتن تولیدی می‌تواند به‌عنوان حفاظ مؤثر در مقابل تابش پرتوهای گاما استفاده شود [٤].

سنگ‌دانه‌ها در بتن حدود ٦٠ تا ٧٥ درصد حجم آن‌را تشکیل می‌دهند از این‌رو خواص فیزیکی، حرارتی و در بعضی اوقات، شیمیایی آن‌ها در عمل‌کرد بتن تأثیر می‌گذارد. پژوهش‌های زیادی برای ارزیابی مصرف ضایعات صنعتی به‌عنوان مصالح برای تولید بتن انجام شده است. خاکستر بادی به‌عنوان یک ماده پوزولانی در بتن برای چندین دهه استفاده می‌شود و سرباره کوره بلند نیز هم به‌عنوان سنگ‌دانه‌ها و هم به‌عنوان مواد سیمانی در بتن استفاده می‌شود. استاندارد ASTM C33 ملزومات را برای استفاده سرباره کوره بلند به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن فراهم می‌کند، در حالی‌که هیچ‌گونه استانداردی برای استفاده سایر سرباره‌ها در بتن وجود ندارد. هم‌چنین تحقیقات زیادی به‌منظور بررسی استفاده از سرباره سرب در بتن صورت نگرفته است. طبق تحقیقات انجام شده [٥]، [٦]، ثابت شده است، استفاده از سرباره سرب تولیدی در فرآیند بازیافت باتری‌های فرسوده به‌عنوان سنگ‌دانه در مخلوط‌های بتنی باعث بهبود مقاومت فشاری و خمشی بتن شده و علاوه بر آن میزان جذب آب بتن تولیدی را افزایش داده است.

مواد و روش کار

وقتی از سرباره سرب به‌عنوان مصالح اولیه در تولید بتن استفاده می‌کنیم، سه معیار اصلی را باید مد نظر قرار دهیم:

هزینه بتن تولیدی، سازگاری سرباره سرب با سایر مواد و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن تولیدی، استفاده موفقیت‌آمیز از سرباره سرب به‌عنوان مصالح بتن به برآورده کردن این سه معیار وابسته است [٤].

هدف اصلی از تحقیق حاضر، بررسی امکان استفاده از سرباره سرب دست اول و دست دوم تولیدی در فرآیند بازیافت باتری‌های سربی به‌عنوان سنگ‌دانه در تولید بتن و تأثیر آن بر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

روی میزان تضعیف پرتوهای گاما است. برای این منظور آزمون‌های زمان گیرش سیمان، مقاومت فشاری، خمشی و کششی و هم‌چنین ضریب تضعیف پرتو گاما بر روی نمونه‌های سیمانی با نسبت‌های مختلف سرباره سرب دست اول و دست دوم انجام شده است.

۱. مشخصات مصالح استفاده شده

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل: سنگ‌دانه طبیعی از نوع رودخانه‌ای و با چگالی ۲/٤۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. دانه‌بندی سنگ‌دانه بر اساس استاندارد ASTM C778 [۷] مطابق با جدول ۱ است.

سیمان مصرفی، از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ سبزوار است و سرباره سرب دست اول و دست دوم استفاده شده در آزمایش نیز از گارگاه بازیافت باتری‌های فرسوده تهیه شده و مطابق با استاندارد ASTM C778 دانه‌بندی شده است. چگالی سرباره دست اول ٤/۰۸ و چگالی سرباره دست دوم ۲/۷٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. آنالیز شیمیایی مربوط به سیمان، ماسه و سرباره سرب مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. آب مصرفی در آزمایش نیز از آب شرب است.

جدول ۱. دانه‌بندی سنگ‌دانه

ابعاد چشمه‌های الک (میلی متر)	مقدار سنگ‌دانه باقی‌مانده روی الک (درصد)
۲/۰۰	۰
۱/٦۰	۷±۵
۱/۰۰	۳۳±۵
۰/۵	٦۷±۵
۰/۱٦	۸۷±۵
۰/۰۸	۹۹±۱

۲. زمان گیرش سیمان پرتلند نوع ۲ حاوی پودرسرب

وقتی که پودر سیمان با مقدار مناسب آب مخلوط می‌شود، به خمیر نرمی تبدیل می‌شود که در اثر مرور زمان حالت خمیری (پلاستیسیته) خود را از دست داده و بالاخره تبدیل به جسم سخت می‌گردد. گیرش واژه‌ای است که برای توصیف این تغییر وضعیت از حالت خمیری به

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

حالت جامد به‌کار می‌رود [۸]. اگرچه پدیده گیرش مرتبط با خاصیت بتن تازه است لیکن در خواص بتن سخت شده از جمله مقاومت و دوام بی‌تأثیر نیست. پیش‌بینی زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن در برنامه‌ریزی مراحل مختلف عملیات اجرایی بتن از قبیل حمل، پمپ، ریختن در قالب، متراکم کردن و پرداخت سطحی بتن به‌طور کامل مؤثر است. از این‌رو اطلاع از زمان‌های گیرش بتن برای تصمیم‌گیری در خصوص استفاده و یا عدم‌استفاده از سرباره سرب به‌عنوان افزودنی به بتن بسیار ضروری است.

زمان گیرش به دو مرحلهٔ گیرش اولیه و گیرش نهایی تقسیم می‌شود. زمان گیرش اولیه مدت‌زمان سپری شده از لحظه اختلاط آب و سیمان است که از آن به‌بعد رشد کریستال‌های ناشی از هیدراسیون سیمان به‌اندازه‌ای است که روانی خمیر رو به‌کاهش می‌گذارد. زمان گیرش نهایی نیز مدت زمان سپری شده از لحظهٔ اختلاط آب و سیمان تا زمانی است که کارایی خمیر به‌کلی از بین می‌رود.

برای تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان از روش سوزن ویکات و طبق استاندارد ASTM C191 استفاده شده است [۹]. در انجام این آزمون از نمونه‌های خمیر سیمان حاوی ۰ تا ۵ درصد پودر سرب با میزان رطوبت نرمال سیمان، استفاده شده است.

جدول ۲. آنالیز شیمیایی مصالح استفاده شده

نوع ترکیب (درصد)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	PbO	Other Compound
سیمان	۲۱/۳	۵/۳	۳/٦۵	٦۱/۸	۲/۷۷	۰/۵۸	۰/۷۳	۲/٤۸	۰	۱/۱٤
سنگ‌دانه طبیعی	٦۳/۳	۱۲	٤/۹	۹/۹	۱/۷	۳/۱	۲/۷	۰/۰۰٤	۰	۲/٤
سرباره سرب دست اول	۱۲/۲	۱/۹	۱۲/۸	۵/۳	۰	۰/۱۸	۰/٤۲	۰/۰۵	٤۸/۵	۱۹/۰۳
سرباره سرب دست دوم	۳۹/۸	۹/٤	۲۱/٦	۹/۱	۰	۰/۹۷	۲/۲	۰/٤۳	٤	۱۲/۵

۳. آزمایش تعیین مقاومت مکانیکی نمونه‌های سیمانی

مقاومت مکانیکی بتن از جمله ویژگی‌های بسیار مهم آن در کاربردهای سازه‌ای است. به‌طورکلی مقاومت ملات یا بتن به انسجام خمیر سیمان، چسبندگی سیمان به سنگ‌دانه‌ها و تا

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

حدی به مقاومت خود سنگ‌دانه‌ها بستگی دارد. تأثیر سیمان بر روی خواص مکانیکی ملات و بتن از نظر کیفی یک‌سان است و رابطهٔ بین مقاومت نمونه ملات سیمان و بتن ساخته شده با نسبت آب به سیمان یک‌سان به‌صورت خطی است. البته مقاومت بتن در مقایسه با ملات ساخته شده با همان نسبت اختلاط بیش‌تر است و دلیل این امر تأثیر سنگ‌دانه‌های بتن در افزایش مقاومت مکانیکی آن است. علاوه بر این مقدار بیش‌تر هوای محبوس شده در ملات سیمان نسبت به بتن در کاهش مقاومت آن بی‌تأثیر نیست [١٠]. به‌منظور بررسی تأثیر سرباره سرب دست اول و دست دوم بر مقاومت مکانیکی بتن، از نمونه‌های سیمانی تهیه شده از یک قسمت وزنی سیمان، سه قسمت وزنی سنگ‌دانه و نصف قسمت وزنی آب استفاده شده است. در تهیه نمونه‌های حاوی سرباره سرب به‌جای سنگ‌دانه طبیعی، سرباره سرب نوع اول و نوع دوم با نسبت‌های ٤٠ تا ٦٠ درصد جای‌گزین شد. جزئیات مربوط به طرح اختلاط نمونه‌های آزمایش در جدول ٣ آورده شده است.

جدول ٣. جزئیات طرح اختلاط نمونه‌های سیمانی حاوی سرباره سرب

نوع ترکیب	علامت اختصاری	نسبت وزنی سیمان	نسبت وزنی آب	نسبت وزنی سنگ‌دانه طبیعی	نسبت وزنی سنگ‌دانه سرب
سیمان نوع ٢ و سنگ‌دانه معمولی	NC	١	٠/٥	٣	٠
سیمان نوع ٢ و سنگ‌دانه سرب (١) ٤٠ رصد	$C\text{-}L_{Sa40}$	١	٠/٥	١/٨	١/٢
سیمان نوع ٢ و سنگ‌دانه سرب (١) ٥٠ درصد	$C\text{-}L_{Sa50}$	١	٠/٥	١/٥	١/٥
سیمان نوع ٢ و سنگ‌دانه سرب (١) ٦٠ درصد	$C\text{-}L_{Sa60}$	١	٠/٥	١/٢	١/٨
سیمان نوع ٢ و سنگ‌دانه سرب (٢) ٤٠ درصد	$C\text{-}L'_{Sa40}$	١	٠/٥	١/٨	١/٢
سیمان نوع ٢ و سنگ‌دانه سرب (٢) ٥٠ درصد	$C\text{-}L'_{Sa50}$	١	٠/٥	١/٥	١/٥
سیمان نوع ٢ و سنگ‌دانه سرب (٢) ٦٠ درصد	$C\text{-}L'_{Sa60}$	١	٠/٥	١/٢	١/٨

مقاومت خمشی ملات سیمان با استفاده از نمونه‌های منشوری به ابعاد ١٦٠×٤٠×٤٠ میلی‌متر و بر اساس استاندارد ASTM C348 و طبق رابطهٔ (٢) تعیین می‌شود [١١].

$$R_f = 1.5\ \frac{F_f L}{b^3} \qquad (٢)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

که در آن: R_f مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال ، b ابعاد مقطع مربعی منشور برحسب میلی‌متر ،F_f بیشینه بار اعمال شده در هنگام شکست برحسب نیوتن و L فاصله دهانه بارگذاری برحسب میلی‌متر هستند.

پس از شکستن نمونه‌های خمشی، طبق استاندارد ASTM C349 می‌توان از قطعات باقی‌مانده برای تعیین مقاومت فشاری استفاده کرد [۱۲]. بر اساس این استاندارد مقاومت فشاری از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید:

$$R_c = \frac{F_c}{2400} \quad (۳)$$

که درآن: R_c مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ، F_c بیشینه بار اعمال شده در هنگام شکست برحسب نیوتن و 2400 سطح فک بارگذاری یا سطح صفحات کمکی (٤٠×٦٠) برحسب میلی‌متر مربع است.

برای نمونه‌های با سطح مقطع مربعی نیز مطابق با استاندارد BS I881 (Part 117) می‌توان مقدار مقاومت کششی ناشی از دونیم شدن را از رابطهٔ (٤) تعیین کرد [۱۳]:

$$R_{ct} = \frac{2F_{ct}}{\pi DL} \quad (٤)$$

که درآن R_{ct} مقاومت کششی ناشی از دونیم شدن برحسب مگاپاسکال، L طول قطعه برحسب میلی‌متر، F_{ct} بیشینه بار اعمال شده بر قطعه در هنگام شکست برحسب نیوتن و D ارتفاع نمونه برحسب میلی‌متر است.

٤. اندازه‌گیری میزان تضعیف پرتو گاما

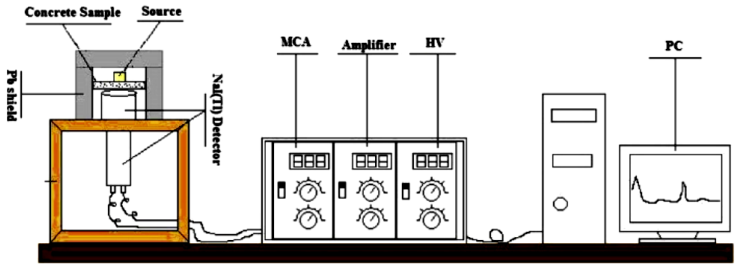
برای تعیین میزان تضعیف پرتو گاما، برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت‌های ۲۰، ۳۰ و٤٠ میلی‌متر ساخته شد. چشمهٔ گاما استفاده شده ^{137}Cs با اکتیویته ۲ میلی‌کوری و آشکارساز نیز از نوع سوسوزن NaI است. طرح شماتیک نحوهٔ قرار گرفتن نمونه‌ها بین منبع پرتو گاما و آشکارساز در شکل۱ نشان داده شده است.

برای محاسبه میزان تضعیف پرتو گاما از رابطهٔ (۱) استفاده می‌کنیم.

پس از تعیین μ از رابطهٔ (۱) مقدار نیم‌لایه جذب (HVL) را از رابطهٔ (۵) محاسبه می‌کنیم.

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (۵)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]



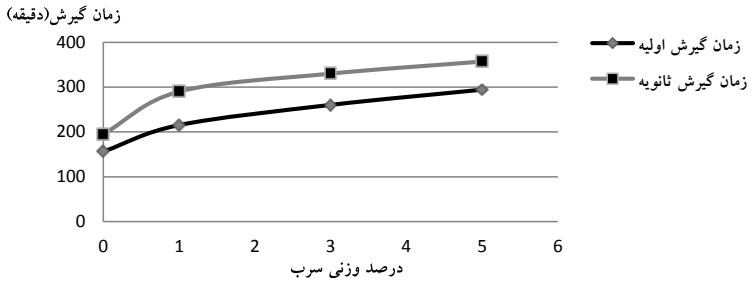
شکل ۱. طرح شماتیک سیستم اندازه‌گیری میزان تضعیف پرتو گاما

نتایج

نتایج مربوط به زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌ها در جدول ٤ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزودن ۱ تا ۵ درصد پودر سرب به خمیر سیمان ، زمان گیرش آن ۳۰ تا ۸۰ درصد به تعویق می‌افتد. در شکل ۲ نیز تأثیر پودر سرب بر افزایش زمان گیرش سیمان نشان داده شده است. نتایج مربوط به مقاومت فشاری، خمشی و کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها و هم‌چنین ضریب تضعیف و ضخامت نیم لایه جذب آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ٤. تأثیر پودر سرب در زمان گیرش سیمان نوع ۲

درصد وزنی سرب به سیمان	۰	۱	۳	۵
زمان گیرش اولیه–زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۱۹۵–۱۵٦	۲۹۰–۲۱۵	۳۳۰–۲٦۰	۳۵۷–۲۹٤



شکل ۲. تاثیر پودر سرب بر زمان گیرش سیمان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

با توجه به نتایج، جای گزینی ٤٠ تا ٦٠ درصد سرباره دست اول (حاوی ٤٥ درصد سرب) به جای سنگ‌دانه طبیعی موجب افزایش ۲۵ تا ۳۸ درصد در مقاومت فشاری و افزایش ۱۲ تا ۲۲ درصد در ضریب تضعیف پرتوهای گاما می‌شود. در حالی‌که با جای‌گزینی ٤٠ تا٦٠ درصد سرباره دست دوم (حاوی ٤ درصد سرب)، ۳ تا ۱۷ درصد افزایش در مقاومت فشاری و ۳ تا ۸ درصد افزایش درضریب تضعیف پرتوهای گاما مشاهده می‌شود. در شکل ۳ الف تأثیر سرباره سرب بر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف بررسی شده است. در شکل ۳ ب نیز تغییرات ضریب تضعیف بتن برای درصدهای مختلف سرباره سرب نشان داده شده است.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سیمانی حاوی سنگ‌دانه‌های سرباره سرب

ردیف	علامت اختصاری	سن نمونه (روز)	دانسیته (gr/cm^3)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت کشش ناشی از دو نیم شدن (MPa)	ضریب تضعیف گاما (1/cm)	نیم لایه جذب (cm)
۱	NC	۷	۲/۱۹۵	۲٦/۲٥	٦/٥٦	۲/۰۹۱	۰/۱۱٤۱	٦/۰۷٤
		۲۸	۲/۱۸٥	٤۱/٦٦	۷/۲٦	۳/۱۸۳		
۲	C-L'$_{Sa40}$	۷	۲/۲۷۱	٤۰	٥/۸٥۹	۳/۷۱۳	۰/۱۱۷۸۲	٥/۸۸۱
		۲۸	۲/۲٦۸	٤٥/۲۸۳	۷/۰۳۱	۳/۸۹		
۳	C-L'$_{Sa50}$	۷	۲/۲۹۸	٤۳/۳۳	٥/۸٥۹	٤/۳۰٦	۰/۱۲۰۲۸	٥/۷٦۱
		۲۸	۲/۳۱۱	٤۸/٦۸	٦/۰۹	۳/۰۸۱٥		
٤	C-L'$_{Sa60}$	۷	۲/۳۲۲	۳۹/۱۷	٥/۸٥۹	۳/۰۹۷	۰/۱۲۳۷۲	٥/٦۰۱
		۲۸	۲/۳٤٥	٤۳/۰٥٥	۷/۳	۳/۲۸۹		
٥	C-L$_{Sa40}$	۷	۲/۳٦۲	۳۷/٥	٥/۲۷	۲/۳۱۱	۰/۱۲۷۹۱	٥/٤۱۸
		۲۸	۲/٤٥۱	٥۲/۰۸۳	۷/٥	۳/۷۱٤		
٦	C-L$_{Sa50}$	۷	۲/٤۷۸	۳۹/٥۸۳	٦/۰۹	۲/۸۳۳	۰/۱۳۲۳۸	٥/۲۳٥
		۲۸	۲/٥۱٦	٥٦/٦۰	۷/۸	۳/٤۰٤		
۷	C-L$_{Sa60}$	۷	۲/٥۷٥	٤٤/۱۷	٦/۳	٤/۳۹۷	۰/۱۳۹۲۹	٤/۹۷٥
		۲۸	۲/٥۳۱	٥۷/٦۹	۸/۲۰۳	٤/٤۲		

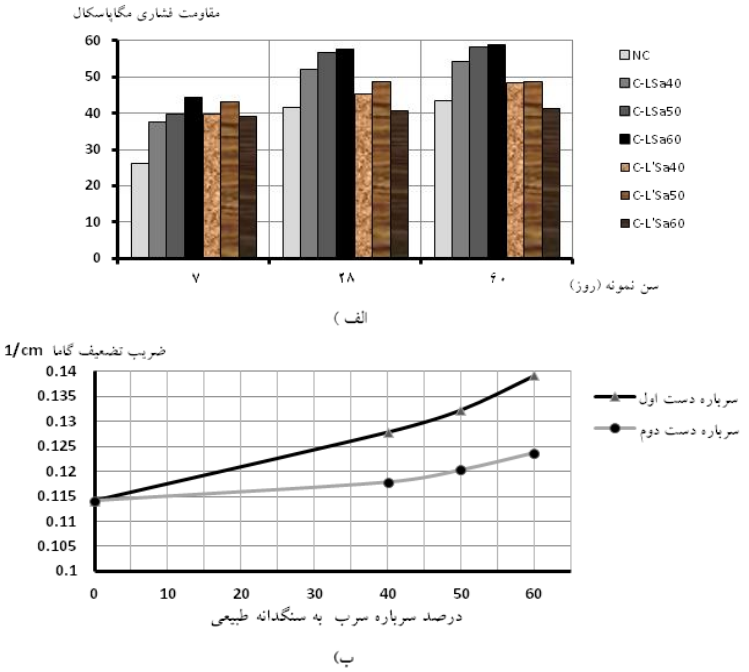
بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد، در حالت کلی جای‌گزینی سرباره سرب به‌عنوان سنگ‌دانه در تولید بتن، باعث افزایش چگالی، مقاومت مکانیکی و ضریب تضعیف آن می‌شود ولی گیرش بتن را به تأخیر می‌اندازد. بر اساس استاندارد ASTM C150 زمان گیرش سیمان باید

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

در محدودهٔ ٤٥ تا ۳۷۵ دقیقه باشد [١٤]. طبق نتایج به‌دست آمده با افزودن پودر سرب تا ۵ درصد وزنی سیمان، زمان گیرش هم‌چنان در محدوده استاندارد قرار دارد ولی استفاده از درصدهای بیش‌تر پودر سرب، ممکن است مشکل‌ساز شود. از این‌رو دانه‌بندی سنگ‌دانه سرب مصرفی به‌گونه‌ای اصلاح می‌شود که میزان پودر سرب موجود در آن، کم‌تر از ۵ درصد وزنی سیمان باشد، تا باعث تأخیر بیش از حد در زمان گیرش نشود.

با توجه به نمودارهای شکل ۲، سرباره دست اول تأثیر بیش‌تری بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بتن محافظ اشعه دارد، به‌طوری‌که ماکزیمم مقاومت فشاری به‌دست آمده از جای‌گزینی سرباره دست اول حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از مقدار مشابه حاصل از جای‌گزینی سرباره دست دوم است. علاوه بر این ضریب تضعیف نمونه‌های حاوی سرباره دست اول نیز به‌دلیل درصد بیش‌تر سرب و در نتیجه چگالی بیش‌تر به‌طور متوسط ۱۰ درصد بیش‌تر از نمونه‌های حاوی سرباره دست دوم است.



شکل ۳. الف) تأثیر سرباره سرب بر مقاومت فشاری بتن، ب) تأثیر سرباره سرب بر ضریب تضعیف بتن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

با بررسی نتایج، مشخص است که استفاده از سرباره سرب در تولید بتن، دو معیار اول (سازگاری سرباره سرب با سایر مواد و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن تولیدی) را برآورده می‌کند. از این رو، برای تصمیم‌گیری نهایی باید هزینه‌های بتن تولیدی ارزیابی شوند. سرباره سرب نسبت به مصالح سنگین مشابه، ارزان‌تر است علاوه بر این، سرباره سرب جزء ضایعات صنعتی به‌شمار می‌آید از این‌رو استفاده از آن در بتن موجب صرفه‌جویی در استفاده از منابع طبیعی و هم‌چنین کاهش مشکلات زیست‌محیطی می‌شود.

در تولید بتن سرباره سرب، استفاده از سرباره دست دوم به‌علت ارزان‌تر بودن نسبت به سرباره دست اول، موجب کاهش هزینه مصالح اولیه می‌شود، اما به‌دلیل ضریب تضعیف کم‌تر، ضخامت بتن مورد نیاز برای حفاظ‌گذاری بیش‌تر شده در نتیجه حجم مصالح مصرفی افزایش یافته و به همان نسبت هزینه‌ها زیاد می‌شوند. به‌همین دلیل برای برآورد هزینهٔ نهایی بتن حاوی سرباره سرب، باید همه مزایا و معایب مهندسی و اقتصادی مصالح در نظر گرفته شوند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش، استفاده از هر دو نوع سرباره سرب به‌عنوان سنگ‌دانه در تولید بتن محافظ اشعه، باعث کاهش ضخامت و در نتیجه کاهش هزینه ساخت حفاظ می‌شود و علاوه بر این از نقطه نظر زیست‌محیطی، اهمیت بسیار زیادی دارد.

منابع

1. Cember H., "Health physics", Second Published, London, Longman Scientific (1960).
2. Kaplan M.F., "Concrete Radiation Shielding", Longman Scientific, First Published (1989).
3. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries, European Commission (2001).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]

4. de Brito J., Saikia N., "Recycled Aggregate in Concrete Use of Industrial, Construction and Demolition Waste", Springer-Verlag, London, First Published (2013)
5. Metwally M.E.A., "Utilizing of slag produced from recycling of spent lead-batteries as concrete aggregate", Alexandria Engineering Journal, Vol.44 (2005).
6. Penpolcharoen M., "Utilization of secondary lead slag as construction material", Cement and Concrete Research Vol.35 (2005).
7. ASTM C778, "Specification for Standard Sand".
8. Mehta P.K., Monteiro P., "Concrete Structures, properties and materials", Englewood cliffs (1993).
9. ASTM C191**,** "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle".
10. Neville A.M., "Properties of Concrete", John Wiley &Sons Inc, Fifth Edition (1997).
11. ASTM C348, "Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars".
12. ASTM C349, "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)".
13. BS I881 (Part 117), "Method for determination of tensile splitting strength".
14. ASTM C150, "Standard Specification for Portland Cement".

Shielding of gamma radiation by heavy concrete includes lead slag

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193]