

## بررسی خواص حفاظتی بتن حاوی میکروسیلیس در برابر تابش گاما

داریوش رضایی<sup>۱</sup>، سارا عظیم‌خانی<sup>۲</sup>، سیدحسین قاسم‌زاده موسوی‌نژاد<sup>۳</sup>

۱- دانشیار گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

E-mail: sara\_azimkhani@yahoo.com

کد E (8F)

### چکیده

بتن حاوی پودر سرب و درصد‌های مختلفی از میکروسیلیس به عنوان حفاظ تابش گاما مورد مطالعه قرار گرفته است. میزان شار عبوری از نمونه‌های بتنی حاوی سرب و میکروسیلیس توسط آشکارساز ۲ اینچی NaI(Tl) در برابر چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  به دست آمده است و سپس ضرایب تضعیف و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه بتن بدون میکروسیلیس و بتن حاوی میکروسیلیس مشخص شده است که افزودن میکروسیلیس به میزان جزیی ضریب تضعیف بتن را کاهش می‌دهد (۲/۹٪). در مقابل، مقاومت فشاری به میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند (۲۲٪). استفاده از ۱۵٪ میکروسیلیس در بتن‌های حاوی سرب پیشنهاد می‌شود.

**کلیدواژه:** حفاظ گاما، بتن، سرب، ضریب تضعیف، میکروسیلیس، مقاومت فشاری

### Abstract

In this research, concrete containing different percentages of lead powder and silica fume was investigated as a gamma shield. Gamma photons emitted from gamma sources of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  were passed through concrete specimens and detected by two inches NaI(Tl) detector to investigate the attenuation coefficients of the specimens. Next, the compressive strengths of the specimens were experimentally studied. A comparison of concrete with and without silica fume revealed that although the addition of silica fume results in a slight reduction of the attenuation coefficient (2.9%), it increases the compressive strength of concrete significantly (22%). The results suggest the usefulness of 15% silica fume in concrete containing lead as a gamma shield.

**Keywords:** Gamma shielding, Concrete, Lead, Attenuation, Silica fume, Compressive strength

## مقدمه

بکار بردن مواد حفاظتی مناسب در برابر پرتوها، یکی از مهم‌ترین عوامل در حفاظت از پرتوها است و مطالعات فراوانی بر روی خواص حفاظتی مواد مختلف مانند مواد بیولوژیکی، عناصر، آلیاژها، ترکیبات و برخی از مواد ساختمانی انجام گرفته است. در بین این مواد، بتن یک ماده پرکاربرد در زمینه حفاظ‌سازی در برابر پرتوهای گاما است [۲،۱]. به منظور افزایش خاصیت حفاظتی بتن در برابر پرتوهای گاما تأثیر مواد مختلفی به عنوان مواد افزودنی بر بتن مورد بررسی قرار گرفته است [۳،۴،۵،۶]. مهم‌ترین عامل در برهمکنش پرتو گاما با ماده اثر فتوالکتریک است که با توان چهارم عدد اتمی متناسب است. بنابراین سرب یکی از بهترین مواد افزودنی بتن برای حفاظت در برابر پرتوهای گاما است [۷،۸]. از طرف دیگر به منظور بهبود بعضی از ویژگی‌های بتن مانند مقاومت، نفوذپذیری، مقاومت در برابر خوردگی، دوام، مقاومت در برابر حمله سولفاتی و نیز به منظور کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش هزینه، مواد افزودنی جایگزین بخشی از سیمان می‌گردند. یکی از بهترین این مواد افزودنی میکروسیلیس است. مطالعات زیادی در مورد اثر میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن صورت گرفته است [۹،۱۰،۱۱]. ولی تحقیقات محدودی در زمینه اثر میکروسیلیس بر روی خواص حفاظتی و مقاومتی بتن‌های ویژه حفاظ پرتوهای گاما صورت گرفته است. از جمله مطالعات معدود در این زمینه می‌توان به بررسی افزودن میکروسیلیس بر سیمان پرتلند مورد استفاده در حفاظ تابش‌های گاما و محاسبه ضرایب تضعیف سیمان پرتلند حاوی میکروسیلیس اشاره کرد [۱۲،۱۳]. به منظور بررسی تأثیر افزودن همزمان مواد جایگزین سیمان و مواد مورد استفاده جهت افزایش خاصیت حفاظتی بتن، لازم است تا بتن حاوی هر دو ماده افزودنی مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین در این مقاله، درصدهای مختلفی از میکروسیلیس را به بتن حاوی پودر سرب اضافه کرده و خواص حفاظتی و مقاومتی آن را مورد مطالعه قرار داده‌ایم. ابتدا نمونه‌های بتنی با رعایت استانداردهای مختلف ساخت بتن، ساخته شده و میزان شار عبوری در برابر پرتوهای گامای حاصل از چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  با استفاده از دکتکتور  $\text{NaI(Tl)}$  به دست آمده و سپس ضرایب تضعیف و مقاومت فشاری بتن محاسبه شده است و در نهایت آنالیز  $^1\text{XRD}$  از چند نمونه بتن صورت پذیرفته است.

## مواد و روش‌ها

برای ساخت بتن معمولی و بتن حاوی سرب از مصالح به شرح ذیل استفاده شده است: سیمان پرتلند تیپ ۱ با عیار  $400 \text{ Kg/m}^3$ ، آب آشامیدنی با نسبت آب به سیمان  $0.45$ ، فوق روان‌کننده به میزان  $2/5$  درصد وزن سیمان، سرب به شکل پودر در حد ریزی دانه‌های سیمان (حدود چند میکرومتر)، میکروسیلیس و سنگدانه با چگالی  $2400 \text{ Kg/m}^3$ . با توجه به اینکه در بتن‌های ویژه حفاظ تابش‌های هسته‌ای دانه‌بندی سنگدانه‌ها از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است تا از جداسدگی بتن جلوگیری شود و حفرات موجود به حداقل برسد، آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها انجام گرفت. به منظور رعایت استاندارد  $\text{ASTM C33}$ ، نصف ماسه موجود از الک شماره  $16 (1/18\text{mm})$  و نصف دیگر از الک شماره  $4 (4/75\text{mm})$  عبور داده شد. کل شن نیز از الک  $3/4"$  عبور داده شد. ابتدا نمونه بتنی بدون افزودن سرب و میکروسیلیس ساخته شد. سپس دو سری از نمونه‌های بتنی حاوی درصدهای مختلفی از میکروسیلیس و پودر سرب ساخته شد. سری اول، نمونه‌های بتنی حاوی پودر سرب به میزان  $0.45$  و  $0.90$  درصد وزن سیمان است که به منظور بررسی تأثیر افزودن میکروسیلیس،  $0.10$  میکروسیلیس جایگزین سیمان شد و سری دوم، نمونه‌های بتنی حاوی پودر سرب به میزان  $0.45$  درصد وزن سیمان است و به منظور تعیین مقدار بهینه میکروسیلیس در بتن ویژه حفاظ تابش هسته‌ای، به میزان  $0.05$ ،  $0.10$  و  $0.15$  میکروسیلیس به آن افزوده شد. درصد وزنی پودر سرب نسبت به وزن سیمان محاسبه و به کل بتن اضافه شد. ولی میکروسیلیس به صورت درصد وزنی سیمان محاسبه و جایگزین بخشی از سیمان شد. نمونه‌های بتنی به شکل مکعب و در ابعاد  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  ساخته شدند. بتن‌ها بعد از  $24$  ساعت از قالب خارج و به مدت  $23$  روز در آب آشامیدنی قرار داده شدند. سپس به مدت  $48$  ساعت در دمای محیط خشک شدند و چگالی آنها در این حالت تعیین شد. چگالی نمونه‌های بتنی که در حالت خشک تعیین شده است، در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از آماده‌سازی نمونه‌های بتنی مراحل پرتودهی در روز  $27$ ام انجام گرفت. در این مرحله هر یک از نمونه‌های بتنی تحت تابش پرتو به مدت  $6$  ساعت در برابر چشمه  $^{137}\text{Cs} (3/7\text{MBq})$  و  $6$  ساعت نیز در برابر چشمه  $^{60}\text{Co} (0.296\text{MBq})$  قرار گرفتند. در چشمه  $^{137}\text{Cs}$  پرتو گاما با انرژی  $0.662\text{Mev}$  و در مورد  $^{60}\text{Co}$  دو پرتو گاما با انرژی  $1/17\text{Mev}$  و  $1/33\text{Mev}$  گسیل می‌شود. آشکارساز مورد استفاده آشکارساز یدور سدیم تالیمدار به ابعاد  $2 \times 2$  است و تحلیل‌گر چندکاناله  $^2\text{MCA}$  و نرم‌افزار  $\text{Cassy Lab}$  نیز برای آنالیز نتایج مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به جهت کاهش تابش زمینه حفاظ سربی در اطراف آشکارساز قرار داده شده است. نمونه‌های بتنی در فاصله  $5\text{cm}$  از آشکارساز و  $2\text{cm}$  از چشمه قرار داده شده‌اند. همچنین از کد  $^3\text{MCNP}$  برای

<sup>1</sup> X-ray diffraction<sup>2</sup> Multi-channel Analyzer<sup>3</sup> Monte Carlo N-Particle

طراحی چیدمان آزمایش پرتودهی، برآورد اولیه در مورد تضعیف پرتوهای گاما در بتن استفاده شده است و میزان شار با استفاده از تالی  $F_4: P = 3.7 \times 10^6$  و  $NPS = 3.7 \times 10^6$  به دست آمده است.

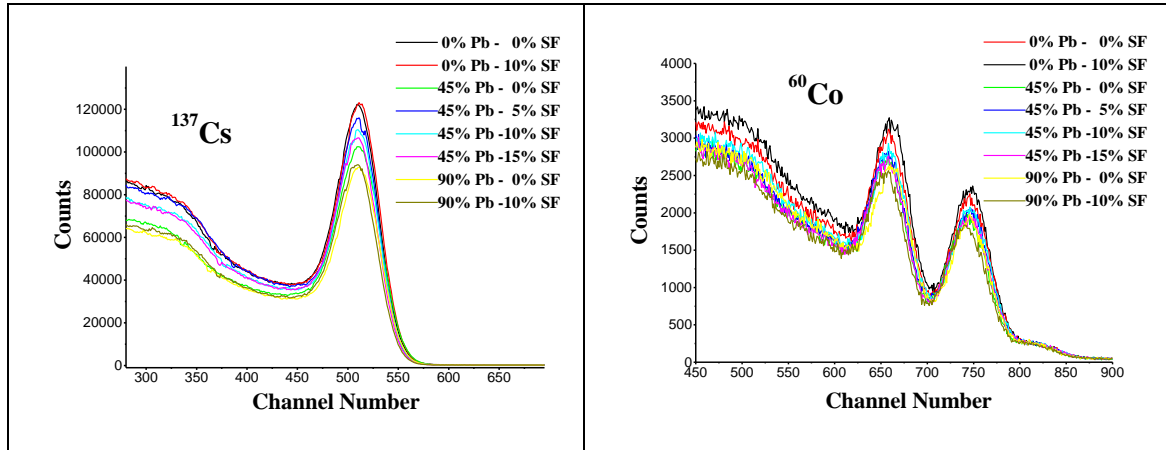
#### جدول ۱. میزان چگالی نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف سرب و میکروسیلیس.

درصد سرب	درصد میکروسیلیس	چگالی ( $gr/cm^3$ )
۰	۰	۲/۱۸۵۰
۰	۱۰	۲/۱۲۴۰
۴۵	۰	۲/۳۹۲۰
۴۵	۵	۲/۳۸۶۰
۴۵	۱۰	۲/۳۷۹۲
۴۵	۱۵	۲/۳۷۱۹
۹۰	۰	۲/۵۷۶۰
۹۰	۱۰	۲/۵۰۳۰

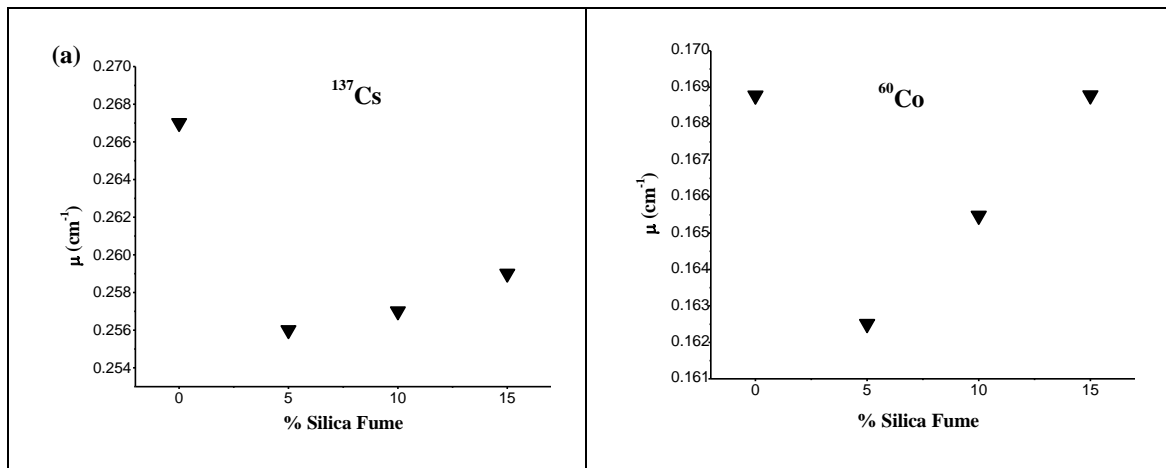
#### نتایج و بحث

طیف انرژی پرتو گامای به دست آمده از چشمه  $^{137}Cs$  و  $^{60}Co$  مربوط به نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس و سرب در شکل ۱ نشان داده شده است. با جمع زیر این منحنی‌های شمارش می‌توان ضریب تضعیف خطی بتن را محاسبه نمود که مهم‌ترین معیار در تعیین عملکرد حفاظتی بتن در برابر تابش‌های گاما است. ضریب تضعیف خطی، احتمال برهمکنش فوتون در واحد طول یا کسری از باریکه پرتو گاما است که در طی گذار از واحد ضخامت ماده جاذب ناپدید می‌شود و معادله معرف آن  $N = N_0 Be^{-\mu x}$  است. در این رابطه  $N_0$  شمارش در غیاب حفاظ بتن و  $N$  شمارش در حضور حفاظ بتن است.  $x$  ضخامت بتن برابر  $10\text{ cm}$  است. ضریب انباشت  $B$  در شرایط هندسی مناسب برابر با ۱ و در شرایط هندسی ضعیف مقدار آن متفاوت از ۱ است. ضرایب انباشت بتن از مرجع ۱۴ استخراج شده است. ضرایب تضعیف خطی بتن حاوی ۴۵٪ سرب بر حسب افزایش درصد میکروسیلیس و بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس بر حسب افزایش درصد سرب در برابر چشمه  $^{137}Cs$  و  $^{60}Co$  در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

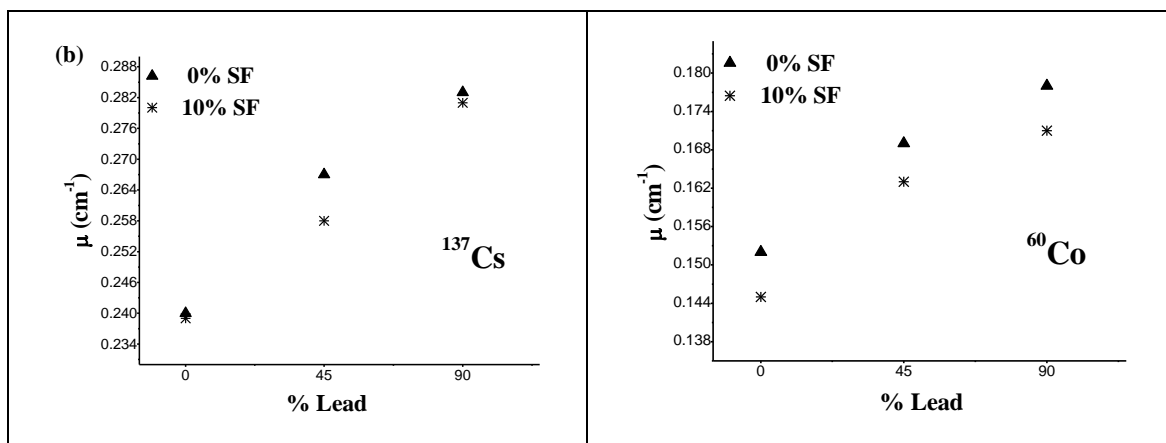
با افزودن سرب به بتن احتمال برهمکنش پرتو گاما با بتن افزایش یافته و ضریب تضعیف بتن افزایش می‌یابد. بتن حاوی ۴۵٪ سرب و بدون میکروسیلیس بیشترین میزان ضریب تضعیف خطی را دارد. با مقایسه بتن حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس مشاهده می‌شود که با افزایش درصد میکروسیلیس، ضریب تضعیف خطی افزایش پیدا می‌کند که این افزایش در برابر هر دو چشمه سزیم ۱۳۷ و کبالت ۶۰ دیده می‌شود با این تفاوت که این افزایش در برابر چشمه کبالت ۶۰ بیشتر است به طوری که ضریب تضعیف خطی بتن حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس تقریباً با میزان ضریب تضعیف خطی بتن بدون میکروسیلیس برابر می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که افزودن سرب باعث افزایش ضریب تضعیف خطی می‌شود ولی افزودن میکروسیلیس به میزان ۱۰٪ ضریب تضعیف خطی را کاهش می‌دهد. میکروسیلیس نسبت به سیمان سبکتر است، بنابراین انتظار داریم افزودن میکروسیلیس موجب کاهش چگالی بتن و در نتیجه افزایش شار عبوری از بتن شود. در نتیجه ضریب تضعیف خطی نیز کاهش می‌یابد. از طرفی، با افزایش بیشتر درصد میکروسیلیس مقدار ضریب تضعیف خطی به تدریج افزایش می‌یابد. قطر متوسط ذرات میکروسیلیس حدود ۰/۱ میکرومتر است و به طور تقریبی ۱۰۰ برابر ریزتر از ذرات سیمان می‌باشند. بنابراین ذرات میکروسیلیس فضای خالی بین ذرات سیمان و سایر اجزای تشکیل دهنده بتن را پر می‌کنند و سبب بهم فشردگی و کاهش تخلخل بین ذرات تشکیل دهنده بتن می‌شوند. بنابراین، به علت کاهش حفرات موجود و بهبود ریز ساختار بتن، میزان پرتوهای گامای عبوری کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱. طیف انرژی پرتو گاما به دست آمده از چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  در حضور بتن حاوی درصدهای مختلف سرب و میکروسیلیس.



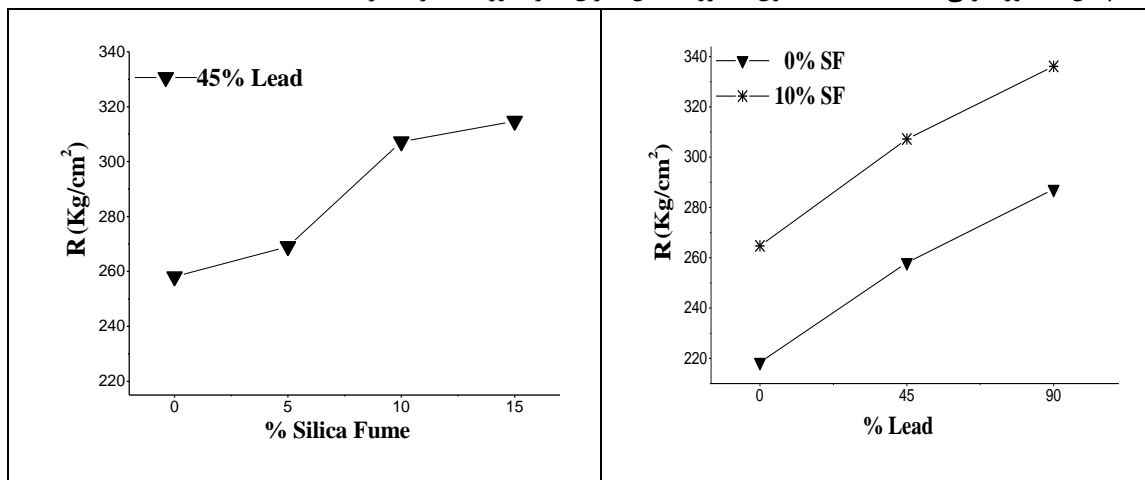
شکل ۲. میزان ضریب تضعیف خطی بتن حاوی ۴۵٪ سرب (نسبت به وزن سیمان) برحسب درصد میکروسیلیس در برابر چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$ .



شکل ۳. میزان ضریب تضعیف خطی بتن بدون میکروسیلیس و بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس برحسب درصد سرب (نسبت به وزن سیمان) در برابر چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$ .

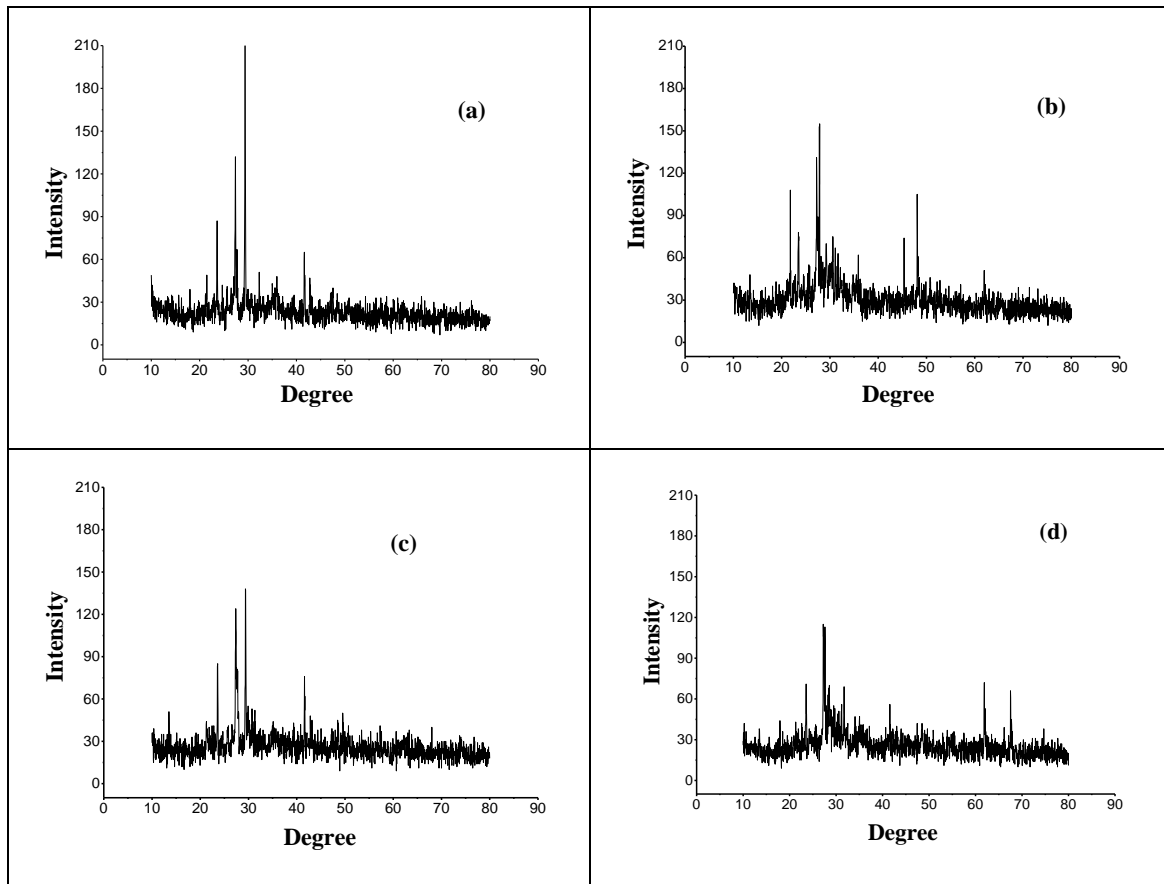
پس از پرتو دهی، در روز ۲۸ام مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بر حسب  $\text{Kg/cm}^2$  تعیین شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۴ مقاومت فشاری بتن‌های حاوی ۴۵٪ پودر سرب با افزایش درصد میکروسیلیس افزایش پیدا می‌کند.

همچنین افزودن پودر سرب تا ۹۰٪ وزن سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود و افزودن میکروسیلیس به میزان ۱۰٪ باعث افزایش بیشتر آن می‌شود. حضور پودر سرب در بتن باعث می‌شود حفرات موجود در بین اجزای تشکیل‌دهنده بتن پر شده و با اصلاح ساختار بتن مقاومت فشاری آن افزایش یابد. با کاهش حفرات موجود در بتن احتمال برهمکنش پرتو گاما با بتن نیز افزایش می‌یابد. همچنین خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس سبب توزیع یکنواخت و همگن محصولات به دست آمده از هیدراسیون می‌شود، در نتیجه خاصیت نفوذ ناپذیری بتن افزایش و مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. به جهت بررسی دقیق‌تر تأثیر افزودن میکروسیلیس، آنالیز XRD برای بتن بدون سرب و میکروسیلیس، بتن حاوی پودر سرب به میزان ۴۵٪ وزن سیمان و ۱۵٪ میکروسیلیس، بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و بدون سرب و بتن حاوی پودر سرب به میزان ۹۰٪ وزن سیمان و بدون میکروسیلیس انجام گرفت که در شکل ۵ نشان داده شده است. برای یک نمونه پیک‌های متعددی در زوایای متفاوت و با شدت‌های متفاوت وجود دارد. در الگوی XRD مربوط به بتن حاوی ۴۵٪ سرب و ۱۵٪ میکروسیلیس پیک‌هایی ظاهر می‌شوند که به تشکیل برخی از پیوندها در مرحله هیدراسیون در نتیجه افزودن سرب و میکروسیلیس نسبت داده می‌شوند. در مرحله هیدراسیون سیمان، واکنش پوزولانی میکروسیلیس با محصولات هیدراسیون آغاز و ترکیباتی مانند هیدروکسید کلسیم  $\text{Ca(OH)}_2$  تولید می‌شود. مواد سیلیسی موجود در میکروسیلیس با این ترکیبات واکنش داده و ترکیبات جدیدی مانند  $\text{CSH}^4$  را به وجود می‌آورد. این ترکیب عامل اصلی مقاومت اضافی بتن حاوی میکروسیلیس است. در درصدهای کم میکروسیلیس این پیوند ضعیف است ولی با افزایش درصد میکروسیلیس و در واقع افزایش ترکیب  $\text{SiO}_2$ ، پیوند  $\text{CSH}$  قوی‌تر می‌شود. قوی‌تر شدن این پیوند نیز سبب افزایش استحکام و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود [۱۵]. باید به این نکته هم توجه کرد که به علت حضور سرب در بتن پیوند  $\text{Pb(OH)}_2$  در مرحله هیدراسیون تشکیل می‌شود و این پیوند نیز بر فعالیت سایر ترکیبات به وجود آمده در مرحله هیدراسیون از جمله  $\text{CSH}$  تأثیر می‌گذارد. در واقع پیوند  $\text{Pb(OH)}_2$  با افزایش تشکیل پیوند  $\text{CSH}$  باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود [۱۶]. بنابراین به نظر می‌رسد برای انجام واکنش بهتر میکروسیلیس در مرحله هیدراسیون به میزان بیشتری از میکروسیلیس نسبت به حالت بتن بدون سرب نیاز داریم. بنابراین در درصدهای کم میکروسیلیس ۵٪ و ۱۰٪ که هنوز واکنش پوزولانی میکروسیلیس کارایی لازم را ندارد با افزودن میکروسیلیس به بتن به علت کاهش چگالی شار عبوری از بتن افزایش می‌یابد ولی با افزایش درصد میکروسیلیس تا ۱۵٪ به علت واکنش پوزولانی کامل میکروسیلیس با ترکیبات هیدراسیون و نیز اصلاح ساختار بتن و کاهش نفوذپذیری آن مقداری از اثر کاهش ضریب تضعیف ناشی از کاهش چگالی تقلیل پیدا می‌کند ولی همچنان به طور جزئی نسبت به حالت بدون میکروسیلیس میزان شار عبوری بالاتری دارد.



شکل ۴. میزان مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن.

<sup>4</sup> calcium silicate hydrate



شکل ۵. نمودار آنالیز XRD برای (a) بتن بدون سرب و میکروسیلیس، (b) بتن حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و پودر سرب به میزان ۴۵٪ وزن سیمان، (c) بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و بدون سرب و (d) بتن حاوی پودر سرب به میزان ۹۰٪ وزن سیمان و بدون میکروسیلیس.

### نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از آزمایش پرتودهی و مقاومت فشاری نشان می‌دهد که افزودن میکروسیلیس به بتن حاوی سرب میزان شمارش پرتوهای گامای عبوری از چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و چشمه  $^{60}\text{Co}$  را به میزان اندکی افزایش می‌دهد. در مقابل، با افزایش درصد میکروسیلیس مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی تا حدود زیادی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین به منظور کاهش هزینه و افزایش مقاومت بتن‌های مورد استفاده به عنوان حفاظ پرتوهای گاما، می‌توان از میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده نمود. میزان بهینه میکروسیلیس بدین منظور ۱۵٪ درصد پیشنهاد می‌شود. بتن حاوی ۴۵٪ سرب و ۱۵٪ میکروسیلیس نسبت به بتن حاوی ۴۵٪ سرب و بدون میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری به میزان  $56 \text{ Kg/cm}^2$  و کاهش ضریب تضعیف خطی به میزان ۲/۹٪ در برابر چشمه سزیم  $^{137}\text{Cs}$  و تقریباً برابر در برابر چشمه کبالت  $^{60}\text{Co}$  می‌شود.

### مراجع

- [1] Havranek, M. "The calculation of the total dose in concretes for radiation shielding design". Nuclear Engineering and Design 16, 249-252. 1971.
- [2] Neville, A.M. Properties of Concrete. Addison Wesley Longman Limited Edinburgh Gate, Harlow Essex, England. 1996.
- [3] Singh, C., Singh, T., Kumar, A., Mudahar, G. "Energy and chemical composition dependence of mass attenuation coefficients of building materials". Annals Nuclear Energy 31, 1199-1205. 2004.
- [4] Basyigit, C. "The physical and mechanical properties of heavyweight concretes used in radiation shielding". Journal of Applied Sciences 6(4), 762-766. 2006.
- [5] Kharita, M.H., Yousef, S., AlNassar, M. "The effect of the initial water to cement ratio on shielding properties of ordinary concrete". Progress in Nuclear Energy 52, 491-493. 2010.

- [6] Akkurt, I., Akhyildirim, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., Basyigit, C. "*Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate*". Annals of Nuclear Energy 37, 910-914. 2010.
- [7] Tsoufanidis, N. Measurement and Detection of Radiation. 2th Edn. Taylor & Francis, University of Missouri-Rolla. 119-122. 1995.
- [8] National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural shielding design and evaluation for megavoltage x- and gamma-ray radiotherapy facilities. Bethesda, MD, USA. NCRP Report 151, 69-72. 2005.
- [9] Pena, P., Rivas Mercury, J.M., de Aza, A.H., Turrillas, X., Sobrados, I., Sanz, J. "*Solid-state  $^{27}\text{Al}$  and  $^{29}\text{Si}$  NMR characterization of hydrates formed in calcium aluminate-silica fume mixtures*". Journal of Solid State Chemistry 181, 1744-1752. 2008.
- [10] Kadri, E.H., Duval, R. "*Hydration heat kinetics concrete with silica fume*". Construction and Building Materials 23, 3388-3392. 2009.
- [11] Song, H.W., Pack, S.W., Nam, S.H., Jang, J.C., Saraswathy, V. "*Estimation of the permeability of silica fume cement concrete*". Construction and Building Materials 24, 315-321. 2010.
- [12] El-Faramawy, N.A., El-Hosiny, F.I. "*The effect of the autoclaving process and addition of silica fume on Portland cement in shielding gamma radiation*". Radiation Measurement 29, 619-623. 1998.
- [13] Turkmen, I., Ozdemir, Y., Kurudirek, M., Demir, F., Simsek, O., Demirboga, R. "*Calculation of radiation attenuation coefficients in Portland cements mixed with silica fume, blast furnace slag and natural zeolite*". Annals of Nuclear Energy 35, 1937-1943. 2008.
- [14] Shimizu, A., Onda, T., Sakamoto, Y. "*Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding,(III) Generation of an Improved Data Set*". Journal of Nuclear Science and Technology 41(4), 413-424. 2004.
- [15] Bentz, D.P., Jensen, O.M., Coats, A.M., Glasser, F.P. "*Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials*". Cement and Concrete Research 30, 953-962. 2000.
- [16] El-Hosiny, F.I., El-Faramawy, N.A. "*Shielding of gamma radiation by hydrated Portland cement-lead pastes*". Radiation Measurements 32, 93-99. 2000.