



## فعال سازی نوترونی و بهینه سازی چیدمان آزمایش با کد مونته کارلو به منظور آنالیز نسبی عناصر اصلی سیمان

صفرعلی صفری\*، سیدعلی موسوی زرنندی، علی جعفری

دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

**چکیده:** ایران چهارمین کشور تولیدکننده‌ی سیمان در جهان و یکی از پیشگامان این صنعت در دنیا به شمار می‌رود. از این رو، مطالعه و پژوهش‌های بیش‌تر در زمینه‌های مربوط به صنعت سیمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در دستگاه‌های تحلیل خط نقاله‌ی سیمان، از روش آنالیز گامای آبی با فعال‌سازی نوترون (PGNAA) استفاده می‌شود. در این پژوهش براساس همین روش، آنالیز نسبی عناصر سیمان با فعال‌سازی نوترون، برای سه نمونه‌ی سیمان با درصد عناصر مشخص انجام گرفت. قبل از آزمایش، پارامترهایی مانند اندازه‌ی نمونه‌ها و ضخامت کندکننده برای نتیجه‌ی بهتر، با کد MCNP بهینه‌سازی شدند. در این آزمایش، شمارش نسبی طیف‌های گرفته شده از سه نمونه‌ی سیمان، با کم کردن زمینه‌ی پیوستار هر یک از قله‌های اصلی انرژی عناصر اصلی سیمان (۳،۵۳۹ و ۴،۹۳۵ MeV برای Si، ۴،۴۱۸ و ۶،۴۱۹ MeV برای Ca، ۵،۹۲ و ۷،۶۳۰ MeV برای Fe و ۷،۷۲۵ MeV برای Al محاسبه و رسم شدند. سپس آنالیز کیفی و نسبی عناصر اصلی سیمان انجام، و با مقادیر واقعی مقایسه شد. در نهایت با محاسبه‌ی خطاهای هر یک از هفت قله‌ی انرژی عناصر اصلی، امکان‌سنجی آزمایش و آزمایشگاه نیز صورت گرفت. این آزمایش‌ها با چشمه‌ی نوترون Am-Be با پرتوایی ۵۵۰ GBq (۱۵Ci) و با آشکارساز یدور سدیم انجام گرفتند.

**کلیدواژه‌ها:** آنالیز، سیمان، فعال‌سازی نوترون، بهینه‌سازی، PGNAA MCNP

## Neutron Activation and Layout Optimization Experiments by MCNP Code for the Main Elements of Cement

S.A. Safari\*, S.A. Moussavi Zarnandi, A. Jafari

Energy Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

**Abstract:** Iran is the fourth largest cement producing country in the world, and one of the pioneers in this industry. For this reason, study and further research in the fields related to the cement industry are of great importance. The cement conveyor on-line analyzer systems use the prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) method. In this paper, based on the same method a comparative analysis for three samples of cement with certain elements was carried out. Prior to the experiment, parameters such as moderator thickness and size of samples were optimized by the MCNP code. In this experiment, the relative counts of the obtained spectra were calculated and plotted by subtraction of the continued background of three cement samples for each of the main peaks of the energy (3.539 and 4.935 MeV for Si, 4.418 and 6.419 MeV for Ca, 5.92 and 7.630 MeV for Fe and 7.725 MeV for Al). Then, the qualitative and relative analyses of the main elements of cement were performed and compared with the actual values. At last, according to the calculated errors for each element of the peak energy, feasibility studies and laboratory experiments were carried out. These experiments were carried out by an Am-Be neutron source with an activity of 555GBq (15Ci) and a NaI detector.

**Keywords:** Analysis, Cement, Neutron Activation, Optimization, MCNP, PGNAA

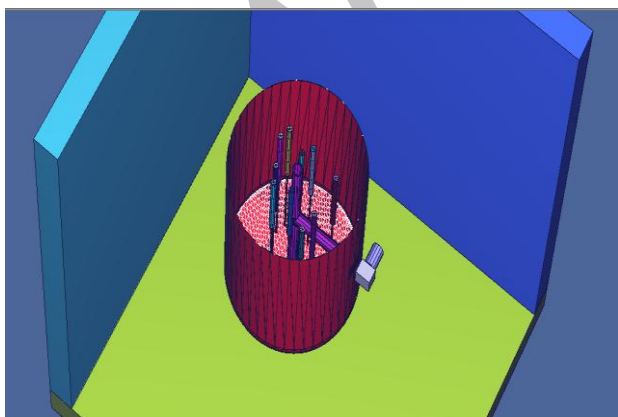
\*email: Safari20@aut.ac.ir



## ۱. مقدمه

مساحت حدوداً  $6 \times 5 \text{ m}^2$ ، مجهز به یک چشمه‌ی نوترون  $\text{Am-Be}$  با پرتوزایی  $555 \text{ GBq}$  ( $15 \text{ Ci}$ )، و دیگر ابزارهای آزمایشگاهی برای کارهای پژوهشی است. در این آزمایشگاه یک تانک استوانه‌ای به شعاع  $80 \text{ cm}$  و ارتفاع  $150 \text{ cm}$  پر از آب معمولی، برای نگهداری چشمه‌ی نوترون در کانال مرکزی، تعبیه شده است. این تانک فولادی، علاوه بر کانال مرکزی (اصلی)، دارای  $10$  کانال کوچک دیگر در شعاع‌های مختلف به منظور پرتودهی در شارهای مختلف نوترون، و همچنین موازی‌ساز استوانه‌ای به شعاع  $5 \text{ cm}$  برای تابش‌دهی‌های خاص است. در شکل ۱، تصویر شبیه‌سازی شده‌ی آزمایشگاه، موقعیت موازی‌ساز، کانال‌ها و تانک قابل مشاهده‌اند.

در آزمایش فعال‌سازی نوترون، علاوه بر چشمه‌ی نوترون و نمونه‌ی مورد آزمایش، به ابزارهای آشکارسازی و طیف‌نگاری شامل آشکارساز پرتو گاما، پیش‌تقویت‌کننده، تقویت‌کننده اصلی (آمپلی فایر)، تحلیل‌گر چندکاناله  $(\text{MCA})^{(1)}$ ، منبع تغذیه  $(\text{HVPS})^{(2)}$  و کامپیوتر همراه با نرم‌افزار تحلیلی و شمارشی نیاز است [۲، ۴]. تجهیزاتی که در آزمایشگاه برای آشکارسازی و طیف‌نگاری استفاده شدند، شامل آشکارساز یدور سدیم با قطر و ارتفاع  $7.6 \text{ cm}$  ( $3 \text{ in}$ ) به همراه پیش‌تقویت‌کننده، اسیلوسکوپ مدل  $\text{TDS-2024C}$ ، تقویت‌کننده‌ی طیف‌نگار مدل  $\text{MCA 4110, 3600}$  و کامپیوتر با نرم‌افزار شمارش‌گر  $\text{IAP Data Acquisition}$  بودند که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱. تصویر شبیه‌سازی شده‌ی تانک چشمه‌ی آزمایشگاه و موقعیت دیگر تجهیزات (کانال‌ها، موازی‌ساز، آشکارساز و پلی‌اتیلن مکعبی) در آزمایشگاه.

ایران چهارمین کشور تولیدکننده‌ی سیمان در جهان، و دارای توانایی‌های بالقوه‌ی بالاتر به دلیل داشتن ذخایر فراوان آن در کوه‌ها و معادن است [۱]. بنابراین نیازمند استفاده از روش‌های به روز دنیا به منظور بهبود کیفیت سیمان برای ارتقاء جای‌گاه خود و رقابت در عرصه‌های جهانی است. کیفیت و مرغوبیت هر کالا به ویژه سیمان، به مواد، عناصر تشکیل‌دهنده و درصد آن بستگی دارد. بنابراین اولین و اصلی‌ترین گام‌های بهبود کیفیت سیمان، آنالیز و تشخیص میزان عناصر موجود در تولید نهایی آن است. چون در نهایت، میزان موجودی این عناصر، ویژگی‌های آن ماده را تعیین می‌کند.

استفاده از فن‌آورهای هسته‌ای در زمینه‌های مختلف صنعتی، قابلیت‌هایی ایجاد می‌کند که بتوان میزان عناصر تشکیل‌دهنده‌ی مواد را تشخیص داد [۲]. یکی از کاربردهای این فن‌آوری، استفاده از دستگاه‌های تحلیل‌گر خط‌نقاله‌ی سیمان در کارخانه‌ها است که براساس روش آنالیز گامای آنی با فعال‌سازی نوترون  $(\text{PGNAA})$  کار می‌کنند. در اصول این روش، از یک چشمه‌ی نوترون به منظور بمباران نمونه‌ی تحت آنالیز استفاده می‌شود، که با گیراندازی نوترون‌ها توسط نمونه، هسته‌های آنها ناپایدار می‌شود و به سرعت با گسیل یک یا چند گامای آنی به پایداری می‌رسند. این گامای گسیلی با یدورسدیم آشکار، و برای شناسایی میزان عناصر، تجزیه و تحلیل می‌شوند [۳].

در این پژوهش، براساس این روش، آنالیز گامای آنی با فعال‌سازی نوترون به صورت تجربی در آزمایشگاه با چیدمان بهینه شده از شبیه‌سازی آزمایشگاه با کد  $\text{MCNP}$  انجام، و صحت آن نیز تجزیه و تحلیل و بررسی شد. بعد از بهینه‌سازی و انجام آزمایش‌ها، نتایج حاصل به صورت کیفی و نسبی با مقادیر واقعی مقایسه شدند که در برخی موارد سازگاری قابل قبول وجود داشت. در نهایت، یک امکان‌سنجی برای این آزمایش و این آزمایشگاه نیز صورت گرفت.

## ۲. معرفی آزمایشگاه و امکانات آزمایش

آزمایشگاه نوترون شهید دکتر مجید شهریاری، یکی از آزمایشگاه‌های هسته‌ای واقع در دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران است. این آزمایشگاه به

می‌شود. در آزمایش‌ها، برای کارایی بهتر و نتیجه‌ی مطلوب‌تر، ضخامت کندکننده باید بهینه شود تا حداکثر نوترون کند در نمونه فراهم شود [۵-۷].

در این پژوهش، برای تعیین ضخامت بهینه‌ی پلی‌اتیلن مکعب، شار نوترون تند و کند برای ضخامت‌های مختلف از ۱ تا ۸cm و با دستور تالی F4 برای نوترون در کد محاسبه شدند. شکل ۳، نتایج حاصل از این محاسبات شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، با افزایش ضخامت پلی‌اتیلن از ۱ تا ۵cm میزان نوترون‌های کند رسیده به نمونه به تدریج افزایش می‌یابد. سپس با افزایش ضخامت پلی‌اتیلن، به دلیل جذب نوترون‌ها در خود پلی‌اتیلن کم می‌شود.

در مورد نوترون‌های تند آنچه می‌توان انتظار داشت و در شکل نیز دیده می‌شود، با افزایش ضخامت پلی‌اتیلن میزان آن‌ها کم می‌شود. بنابراین در این مرحله، ضخامت بهینه‌ی پلی‌اتیلن حدوداً ۵cm تعیین می‌شود.

آنالیز عنصری با فعال‌سازی نوترون وقتی بهتر انجام خواهد شد که میزان گامای رسیده و ثبت شده‌ی آن‌ها در آشکارساز بیش‌ترین مقدار را نسبت به کل شار داشته باشد [۸، ۹]. بیان این مطلب در عبارت "بهره‌ی انرژی"<sup>(۳)</sup> خلاصه می‌شود. در واقع، آنالیز وقتی مطلوب‌تر انجام می‌شود که قله‌ی انرژی‌های عناصر مورد آنالیز بالاتر برود، و این بالا رفتن اندک قله نیز ناشی از افزایش بهره‌ی کنش  $(n, \gamma)$  در نمونه خواهد بود. بنابراین مرحله‌ی بعدی شبیه‌سازی برای محاسبه‌ی بهره‌ی انرژی  $MeV 3/540$  برای  $(n, \gamma)$   $MeV 4/935$ ،  $Si$ ،  $MeV 4/418$ ،  $Ca$ ،  $MeV 7/630$ ،  $Fe$  و  $MeV 7/725$  انجام گرفت. در کد MCNP، برای محاسبه‌ی بهره‌ی انرژی‌ها، از دستور تالی F4 و F8 برای فوتون‌ها در ضخامت‌های مختلف پلی‌اتیلن از ۱ تا ۸cm استفاده شد. نتایج حاصل از آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. (برای راحتی در فهم شکل، انرژی گاماها‌ی گسیلی از نمونه به همراه عناصر آن نشان داده شده‌اند). به این ترتیب، در این مرحله نیز ضخامت بهینه‌ی پلی‌اتیلن از ۴ تا ۵cm تعیین می‌شود که نتایج مرحله‌ی قبل را نیز تأیید می‌کند.



شکل ۲. چیدمان آزمایش PGNA و تجهیزات طیف‌نگاری استفاده شده در آزمایشگاه نوترون شهید دکتر شهریار.

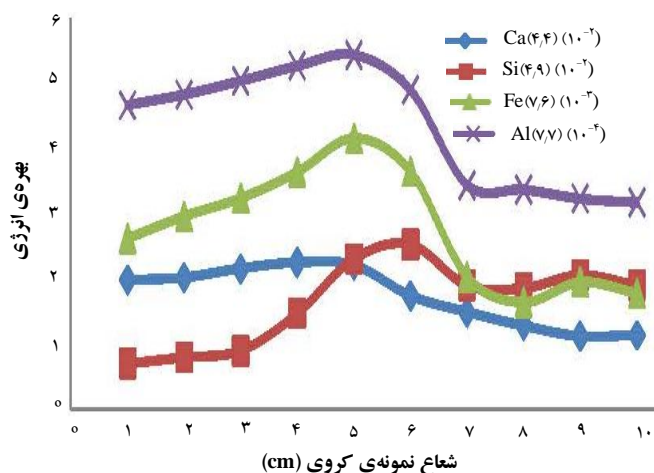
### ۳. بهینه‌سازی آزمایش با کد MCNP

در آنالیز با فعال‌سازی نوترون، چینی‌سازی باید به گونه‌ای بهینه شود که طیف مناسب و قابل‌تحلیلی در آشکارساز بتواند ثبت شود. برای این کار، بیش‌تر از محاسبات شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود [۵]. بر این اساس، ابتدا محیط آزمایشگاه برای به دست آوردن پارامترهای بهینه‌سازی، در کد MCNP شبیه‌سازی شدند (شکل ۱). بهینه‌سازی برای آنالیز با فعال‌سازی نوترون به معنی افزایش میزان نوترون کند در نمونه و در نتیجه افزایش بهره‌ی کنش  $(n, \gamma)$  و در نهایت بیشینه‌ی شمارش قله‌های انرژی عناصر نمونه در آشکارساز است. افزایش یا کاهش ضخامت کندکننده و هم‌چنین اندازه‌ی نمونه، در تعداد بهره‌ی کنش  $(n, \gamma)$  و گاماها‌ی رسیده به آشکارساز و ثبت طیف مناسب، تأثیر به‌سزایی دارد.

#### ۱.۳ تعیین ضخامت بهینه‌ی کندکننده

تعیین ضخامت بهینه‌ی کندکننده، با شبیه‌سازی کد MCNP به دو منظور صورت گرفت؛ یکی برای فراهم شدن حداکثر نوترون کند در نمونه، و دیگری برای بیشینه‌سازی بهره‌ی گاماها‌ی عناصر اصلی سیمان (Al, Fe, Ca, Si) در آشکارساز.

سطح مقطع جذب نوترون و بهره‌ی کنش  $(n, \gamma)$ ، به شدت وابسته به انرژی نوترون‌هاست. در فعال‌سازی نوترون برای افزایش نرخ بهره‌ی کنش  $(n, \gamma)$ ، نیاز به کند کردن نوترون‌ها است. برای این کار از کندکننده‌های نوترون (مثل پلی‌اتیلن) استفاده



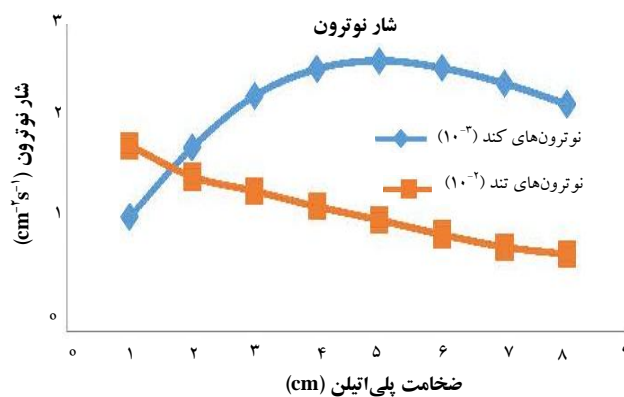
شکل ۵. بهره انرژی چهار عنصر اصلی سیمان در آشکارساز در شعاع‌های مختلف نمونه‌ی گروهی سیمان در کد MCNP.

بنابراین نتایج کلی بهینه‌سازی با کد MCNP، ضخامت مناسب پلی‌اتیلن را از ۴ تا ۵cm، و شعاع مناسب نمونه سیمان را پیش‌بینی می‌کند.

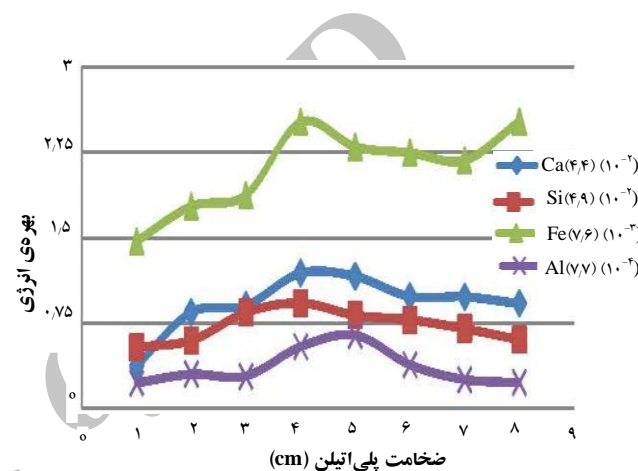
#### ۴. روند انجام آزمایش

برای انجام آزمایش PGNAA، سه نمونه سیمان، به ترتیب پرتلند تیپ ۱، پرتلند تیپ ۲ و سیمان سفید با درصد ترکیب‌های مشخص که در شکل ۶ نشان داده شده‌اند، انتخاب شدند. این نمونه‌های تقریباً ۸۰۰ میلی‌گرمی، در نایلون‌های گروهی به شعاع ۵cm تهیه شدند.

در ابتدا یکی از نمونه‌های گروهی سیمان در داخل مکعب پلی‌اتیلنی (با ضخامت بهینه و اندازه‌ی  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ )، در سمت روبه‌روی دهانه‌ی موازی‌ساز، نزدیک تانک چشمه‌ی نوترون قرار داده شد. سپس آشکارساز یدور سدیم در داخل پوسته‌ی استوانه‌ای سربی و در نزدیک‌ترین فاصله از نمونه جاگذاری شد. در ادامه، با وصل کردن آشکارساز، MCA، کامپیوتر و بقیه‌ی تجهیزات با کابل‌های رابط و نیز تنظیم‌های نرم‌افزار شمارش IAP کامپیوتر بر روی ۱۰۲۴ کانال در انرژی‌های ۰ تا ۵MeV، چیدمان آزمایش برای انجام آزمایش PGNAA آماده شدند (شکل ۲).



شکل ۳. میزان شار نوترون‌های تند و کند در داخل نمونه‌ی سیمان در ضخامت‌های مختلف پلی‌اتیلن مکعب در کد MCNP.



شکل ۴. بهره انرژی چهار عنصر اصلی سیمان در آشکارساز در ضخامت‌های مختلف پلی‌اتیلن در کد MCNP.

#### ۲.۳ تعیین اندازه‌ی بهینه‌ی نمونه

برای تعیین شعاع بهینه‌ی نمونه‌ی گروهی نیز محاسبات در کد MCNP انجام گرفت. برای این کار نیز از دستور F4 و F8 برای به دست آوردن بهره انرژی‌های عناصر اصلی سیمان در آشکارساز در شعاع‌های مختلف از ۱ تا ۱۰cm استفاده شد. نتایج حاصل از محاسبات کد در شکل ۵ نشان می‌دهد که اندازه‌ی بهینه‌ی شعاع نمونه‌ی سیمان ۵cm است. نکته‌ی جالبی که در شکل دیده می‌شود این است که در شعاع‌های ۶ و ۷cm، بهره‌های انرژی یک باره به شدت افت می‌کنند. علت آن، به اندازه‌ی شعاع موازی‌ساز ( $r=5\text{cm}$ ) مربوط می‌شود. چون در شعاع بیرونی موازی‌ساز، نوترون کم‌تری با کل نمونه برخورد کرده است، میزان کم‌تری از نمونه فعال می‌شود، و در نتیجه گاماها کم‌تری از نمونه به آشکارساز می‌رسند. البته دلیل کوچک دیگری هم دارد و آن این است که وقتی شعاع نمونه زیاد شود تضعیف گاما شدت می‌یابد.



سه نمونه و هم چنین تابش زمینه (بدون نمونه) بدون تغییر چیدمان آزمایش تکرار شدند.

### ۵. نتایج آزمایش‌ها و آنالیز کیفی آن‌ها

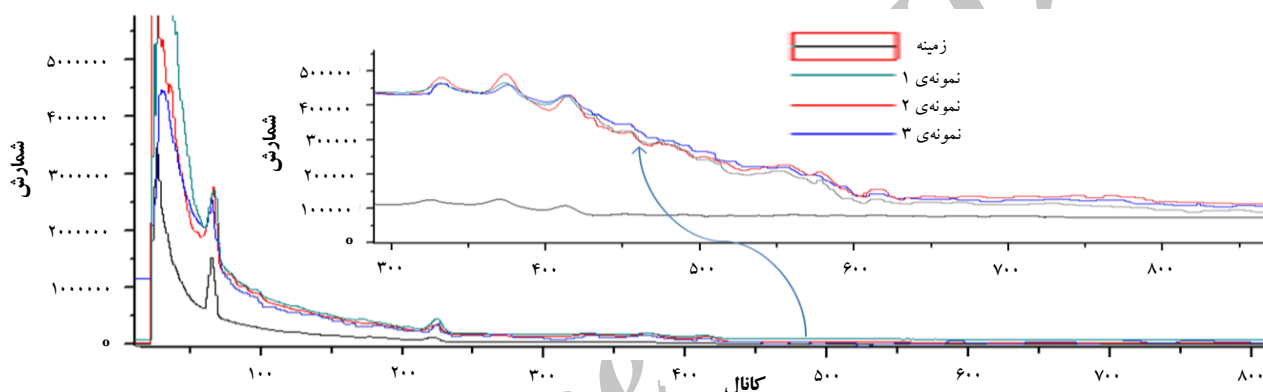
نتایج شمارش آزمایش برای سه نمونه‌ی سیمان و تابش زمینه در یک نمودار در شکل ۷ رسم شدند. در ادامه، با کم کردن شمارش تابش زمینه، شمارش طیف‌های خالص مربوط به این سه نمونه در دو نمودار جداگانه‌ی بزرگ‌نمایی شده در شکل ۸ رسم شدند. برای کالیبره کردن آزمایش نیز از سه چشمه‌ی گامای  $^{60}\text{Co}$  (با انرژی‌های ۱۳۳۲ و ۱۱۷۰ keV)،  $^{22}\text{Na}$  (با انرژی ۱۲۷۵ و ۵۱۱ keV) و  $^{137}\text{Cs}$  (با انرژی ۶۶۲ keV) موجود در آزمایشگاه استفاده شد.

|                                | نمونه‌ی ۱ | نمونه‌ی ۲ | نمونه‌ی ۳ |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| CaO                            | ۶۴٫۷۵     | ۶۳٫۱۲     | ۶۵٫۳۲     |
| SiO <sub>۲</sub>               | ۲۱٫۱۳     | ۲۲٫۵      | ۲۳٫۵۲     |
| Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub> | ۳٫۸۲      | ۵٫۰۶      | ۴٫۶۵      |
| Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub> | ۲٫۹۵      | ۳٫۹       | ۱٫۴۴      |

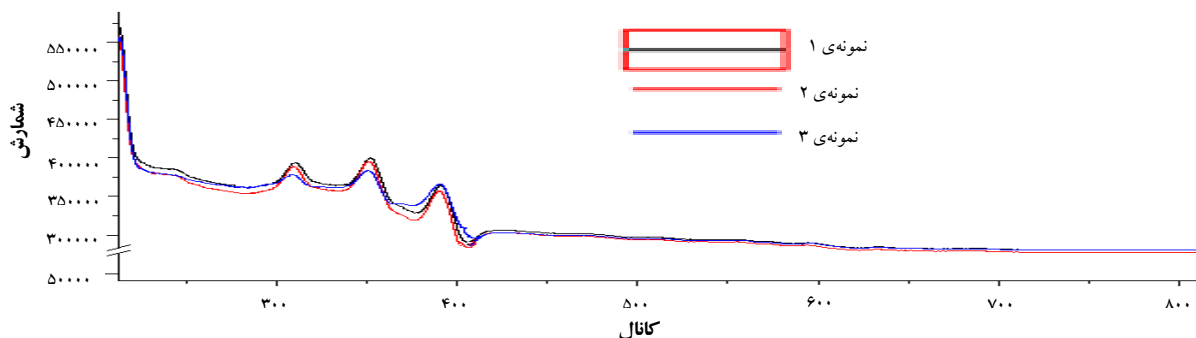
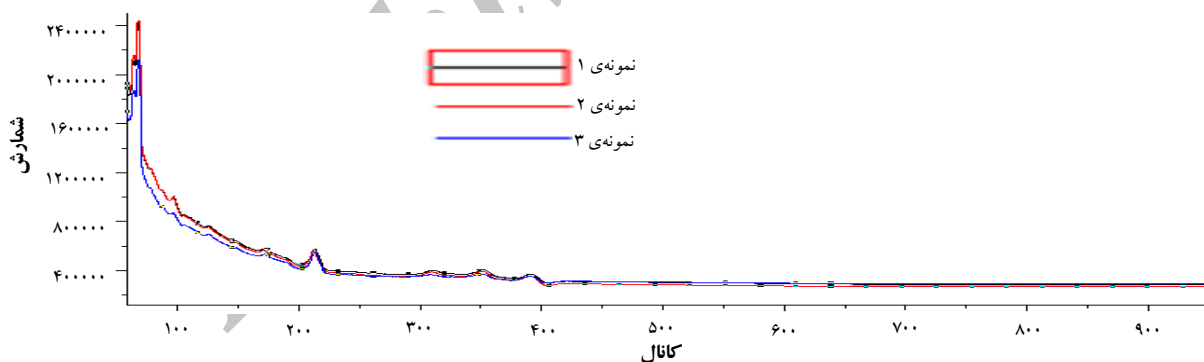


شکل ۶. نمونه‌های سیمان انتخاب شده و درصد ترکیبات آنها.

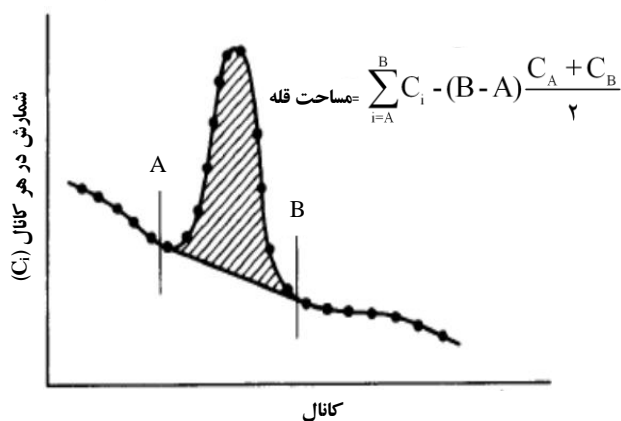
بعد از پایان یافتن چیدمان آزمایش و تنظیم‌های آنها، ثبت نتایج آبی گاماها‌ی گسیلی، از نمونه‌ی تحت بمباران نوترونی انجام شد. برای جبران تعداد آشکارساز کم‌تر (۱ عدد) و شار نوترونی نسبتاً کم رسیده به نمونه، مدت زمان شمارش، نسبتاً طولانی انتخاب شد (حدوداً ۱۲h). تمام مراحل آخری، برای هر



شکل ۷. طیف‌های شمارشی خام حاصل از آزمایش PGNAA برای سه نمونه‌ی سیمان و تابش زمینه.



شکل ۸. طیف‌های شمارش حاصل از آزمایش PGNAA برای سه نمونه‌ی سیمان بعد از کم کردن شمارش تابش زمینه در دو بزرگ‌نمایی مختلف.



شکل ۹. شیوهی محاسبه‌ی مساحت زیر قله در آنالیز کیفی و شمارش‌های مقایسه‌ای [۴].

بنابراین، چون آزمایش هر سه نمونه بدون تغییر چیدمان و با شرایط یکسان انجام شده بود، به منظور آنالیز کیفی و نسبی طیف‌ها از روش مساحت زیر قله استفاده شد. برای این منظور، محاسبه‌ی سطح زیر قله، برای هر هفت انرژی اصلی عناصر سیمان، مطابق روش نشان داده شده‌ی شکل ۹، از طیف آزمایش‌ها انجام گرفت. مقادیر این شمارش محاسبه شده، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

مقایسه‌ی میزان شمارش‌های هر سه نمونه برای هر یک از انرژی‌های عناصر سیمان در جدول ۱، با مقادیر واقعی این سه نمونه در داده‌های شکل ۶، مفید بودن آزمایش و نتایج آن را نشان می‌دهد. برای دقیق‌تر شدن در نتایج مقایسه‌ای آزمایش‌ها، نسبت شمارش‌های نمونه‌ی ۱ به نمونه‌ی ۲، نمونه‌ی ۱ به نمونه‌ی ۳ و نمونه‌ی ۲ به نمونه‌ی ۳ برای هر یک از ۷ انرژی اصلی سیمان به همراه مقادیر واقعی این نسبت‌ها (نسبت درصد نمونه‌ی ۱ به نمونه‌ی ۲، ...) محاسبه، و در سه نمودار جداگانه در شکل ۱۰ رسم شده‌اند.

سازگاری نمودارهای واقعی و آزمایش نشان داده شده در سه نسبت نمونه‌ها، نشان‌دهنده‌ی نتیجه‌بخش بودن آزمایش است. این سازگاری در انرژی‌های پایین‌تر به مراتب بیش‌تر است، اما در انرژی‌های بالا هم‌خوانی دو نمودار کم‌تر می‌شود. در نهایت، با دست داشتن نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مقادیر واقعی نسبت‌ها، درصد خطای هر یک از نسبت‌های حاصل از آزمایش و متوسط درصد خطای نسبت‌ها، برای هفت قله‌ی انرژی اصلی سیمان در جدول ۲ ثبت شده است (درصد خطای نسبت‌ها به صورت اعداد گرد نوشته شده‌اند).

در آنالیز روی خط درجا\*، از آنالیز قله‌های منحصر به فرد استفاده نمی‌شود، بلکه روش‌های مختلف طیف کامل به کار می‌روند [۳]. ولی در آنالیز کیفی و شمارش‌های مقایسه‌ای با اندکی خطا، با کم کردن زمینه‌ی پیوستار هر یک از قله‌ها مطابق شکل ۹، می‌توان از آنها در طیف بهره برد. این روش، مساحت زیر قله<sup>(۴)</sup> نام دارد، و برای محاسبات دستی با دقت کم، مفید است [۴، ۱۰].

لازم به ذکر است که در نتایج طیف‌ها ممکن است در برخی انرژی‌های عناصر سیمان، تداخل انرژی رخ دهد. اگر این تداخل انرژی‌ها، حاصل از انرژی مواد ثابت آزمایشگاهی باشد، اختلال خیلی زیادی در نتایج ایجاد نمی‌کند. چون عمده‌ی مقادیر آنها برای هر سه آزمایش ثابت است و جزو تابش زمینه (بدون نمونه) محسوب می‌شود. در شمارش خالص با حذف شمارش زمینه، این مشکل تا حدودی برطرف می‌شود. مثلاً تداخل انرژی ۴٫۴ MeV کلسیم و ۴٫۴ MeV کربن که معمولاً ناشی از کندکننده‌ی پلی‌اتیلن است) در شمارش خالص با کم کردن انرژی تابش زمینه، شمارش قله‌ی ناشی از انرژی کربن تا حدودی حذف می‌شود. البته گرچه نتایج خطاها (مخصوصاً برای انرژی ۴٫۴ MeV) این مطلب را تأیید می‌کند، ولی به طور کلی در روش PGNAA، تداخل انرژی صرفاً با حذف شمارش زمینه به طور کامل برطرف نمی‌شود و خطاهایی نیز به دنبال دارد (چون وجود خود نمونه روی طیف نوترون اثر می‌گذارد و طیف شمارش زمینه را اندکی تغییر می‌دهد). بنابراین تداخل‌هایی که ناشی از مواد ثابت آزمایشگاهی رخ می‌دهند، می‌توانند مقدار کمی خطا ایجاد کنند، ولی آن‌هایی که ناشی از انرژی‌های عناصر اصلی سیمان هستند، ممکن است میزان خطای آزمایش را بالا ببرند. وجود این تداخل‌ها به ویژه در انرژی‌های پایین و انرژی‌های ناشی از گاماها تأخیری باعث می‌شود که حتی انرژی ۱٫۹۴ MeV کلسیم و ۱٫۷۸ MeV آلومینیم که درصد زیادی از انرژی گسیلی این عناصر محسوب می‌شوند، برای آنالیز عنصری قابل استفاده نباشند. ولی در حالت کلی، همان‌طور که گفته شد، از روش مساحت زیر قله، با اندکی خطا (برای سایر انرژی‌ها) می‌توان در محاسبات شمارش مقایسه‌ای استفاده کرد.

\*: در برخی از کارخانه‌های سیمان برای کنترل کیفی خط تولید، از دستگاه‌های "تحلیل‌گر خط نقاله سیمان" استفاده می‌شود. در این دستگاه‌ها نتایج به صورت آبی و درجا تحلیل شده و آنالیز روی خط درجا انجام می‌گیرد.



**جدول ۱.** میزان شمارش محاسبه شده با روش مساحت زیر قله برای انرژی گاماها‌ی عناصر اصلی سیمان برای سه نمونه‌ی سیمان مورد آزمایش و زمینه‌ی تابش.

| شماره انرژی | عنصر | انرژی (MeV) | شمارش تابش زمینه | شمارش نمونه ۱ | شمارش نمونه ۲ | شمارش نمونه ۳ |
|-------------|------|-------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| ۱           | Si   | ۳,۵۳۹       | ۱۸۱۷۵۶۳          | ۳۸۱۲۵۴۵       | ۴۱۷۲۲۰۳       | ۴۴۳۴۲۷۸       |
| ۲           | Ca   | ۴,۴۱۸       | ۱۱۸۹۳۰۴          | ۲۲۵۶۸۲۴       | ۲۰۸۳۲۲۱       | ۲۴۷۲۸۷۱       |
| ۳           | Si   | ۴,۹۳۵       | ۲۳۰۸۹۷           | ۴۰۹۹۲۳        | ۴۲۵۷۹۲        | ۴۴۰۸۱۱        |
| ۴           | Fe   | ۵,۹۲        | ۱۸۱۵۳۲           | ۲۶۰۳۹۸        | ۲۸۴۸۵۲        | ۱۴۵۵۸۱        |
| ۵           | Ca   | ۶,۴۱۹       | ۱۳۷۱۹۵           | ۱۸۴۷۸۶        | ۱۵۳۸۵۲        | ۲۰۷۸۷۷        |
| ۶           | Fe   | ۷,۶۳        | ۴۶۳۷۱            | ۶۲۸۷۲         | ۶۹۰۲۴         | ۲۸۵۷۱         |
| ۷           | Al   | ۷,۷۲۵       | ۳۴۱۰۶            | ۴۱۴۱۹         | ۴۱۴۲۴         | ۴۲۴۶۷         |

**جدول ۲.** درصد خطای نسبت نمونه‌ها و متوسط درصد خطای کل نسبت‌ها

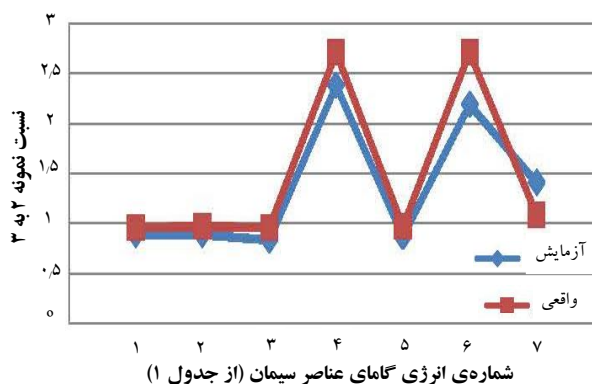
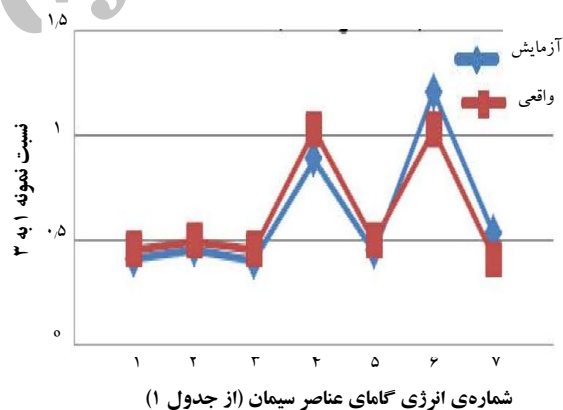
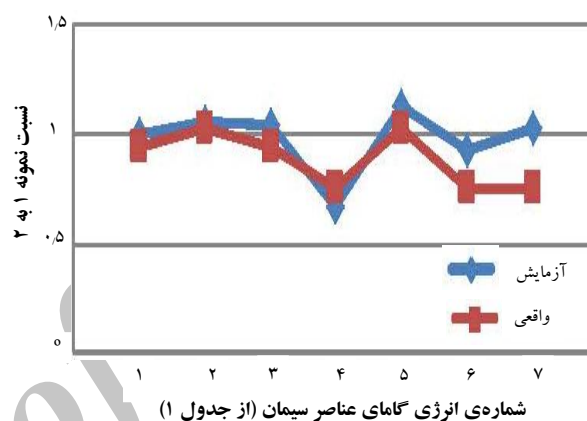
برای هفت قله‌ی انرژی عناصر اصلی سیمان

| شماره انرژی (MeV) | درصد خطای نسبت‌ها و متوسط خطای کل نسبت‌ها برای هر یک از انرژی‌ها |                      |                      | متوسط درصد خطای هر |
|-------------------|--|----------------------|----------------------|--------------------|
|                   | درصد خطای نسبت نمونه   | درصد خطای نسبت نمونه | درصد خطای نسبت نمونه |                    |
| ۱                 | ۱۰   | ۹                    | ۸                    | ۹                  |
| ۲                 | ۴  | ۴                    | ۶                    | ۴,۶۶               |
| ۳                 | ۱۱   | ۱۴                   | ۱۳                   | ۱۲,۶۶              |
| ۴                 | ۱۱   | ۱۳                   | ۱۷                   | ۱۳,۶۶              |
| ۵                 | ۱۲   | ۱۰                   | ۹                    | ۱۰,۳۳              |
| ۶                 | ۱۹   | ۱۵                   | ۲۱                   | ۱۸,۳۳              |
| ۷                 | ۳۵   | ۲۴                   | ۳۳                   | ۳۰,۶۶              |

در انتها برای ارزیابی کلی از نتایج آزمایش، متوسط خطای سه نسبت بیان شده در هر یک از انرژی‌های عناصر اصلی سیمان، در یک نمودار میله‌ای (با اعداد گرد شده) در شکل ۱۱ رسم شده است.

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به طور کلی، نتایج حاصل از شمارش نسبی، آنالیز کیفی و محاسبه‌ی خطاهای نسبی (شکل ۱۱) بیان‌کننده‌ی این واقعیت بودند که برای این آزمایش در این آزمایشگاه و با امکانات آن، در انرژی‌ها کم‌تر از ۶,۴ MeV، خطای تقریباً قابل‌قبولی مشاهده می‌شود، ولی برای انرژی‌های بالاتر، این خطا به مراتب بیشتر می‌شود و آزمایش از اطمینان کم‌تری برخوردار است. البته یکی از دلایل آن به عوامل ذاتی آزمایش مربوط می‌شود؛ مانند تداخل انرژی‌ها، آثار غیرخطی آشکارساز یدور سدیم مثل کاهش بازدهی آشکارساز و کاهش قدرت تفکیک با افزایش انرژی. دلیل دیگر به خود عناصر مورد آنالیز مربوط می‌شود؛ مثلاً کم



**شکل ۱۰.** مقایسه‌ی نسبت مقادیر واقعی نمونه‌ها با نسبت شمارش حاصل از آزمایش نمونه‌ها، برای هفت قله‌ی انرژی عناصر اصلی سیمان.

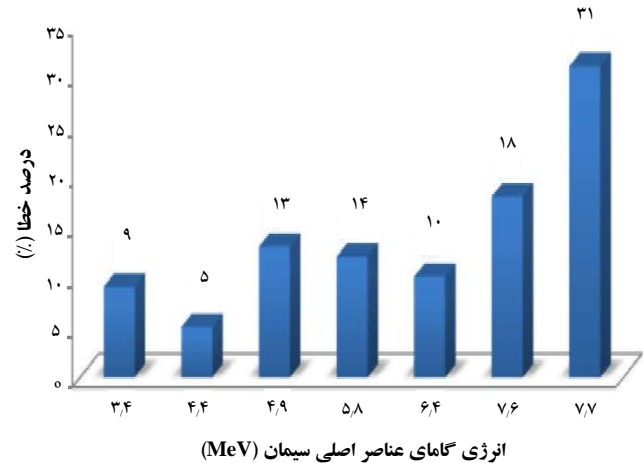


امکان انجام بهتر آزمایش را فراهم آورد. این کار برای آنالیز دقیق سیمان به صورت یک موضوع پژوهش پیشنهادی نیز توصیه می‌شود.

این پژوهش و نتایج آن می‌تواند هم مقدمه‌ای برای توسعه و گسترش آزمایش‌های مشابه برای سیمان و هم یکی از منابع مفید در این زمینه یا ساخت و راه‌اندازی دستگاه‌های تحلیل‌گر سیمان با روش فعال‌سازی نوترون در داخل کشور باشد.

### پی‌نوشت‌ها

1. Multi Channel Analyzer
2. High Voltage Power Supply
3. Energy Yield
4. The Area Under The Peak Method



شکل ۱۱. خطای متوسط هر یک از انرژی‌های عناصر اصلی سیمان.

بودن سطح مقطع جذب Si و Al نسبت به سطح مقطع جذب Ca و Fe. تأثیر این عامل در خطاهای ثبت شده در شکل ۱۱ نیز کاملاً مشهود است و در مورد Al به ویژه این عامل و هم چنین میزان کم آن در نمونه، سبب می‌شود که تحلیل‌گرهای سیمان نیز با خطای زیادی مواجه باشند. خطاهای به دست آمده نیز همین مطلب را تأیید می‌کنند.

بنا بر آنچه گفته شد، امکان‌سنجی این آزمایش در این آزمایشگاه (حتی برای مواد مشابه)، به طور کلی به دو عامل بستگی دارد؛ ویژگی عناصری که آنالیز می‌شوند، و میزان در دسترس بودن امکانات آزمایش.

از ویژگی عناصر، نخست مقدار سطح مقطع جذب نوترونی آنهاست که میزان گیراندازی نوترون و در نهایت تعداد برهم کنش ( $n, \gamma$ ) را نشان می‌دهد. دوم تعداد و میزان گاما‌های گسیلی بعد از جذب نوترون است. هر چه سطح مقطع جذب عنصری و تعداد گاما‌های گسیلی بعد از جذب نوترون بیشتر باشد، آنالیز با دقت بیشتری انجام می‌شود. از میزان دسترسی به امکانات آزمایشگاهی به تعداد آشکارساز بیشتر، چشمه‌ی نوترونی قوی‌تر (برای شار نوترونی بالا)، نرم‌افزار دقیق تحلیل‌گر شمارش و غیره می‌توان اشاره کرد. دسترسی به یک نرم‌افزار دقیق تحلیل‌گر شمارش و استفاده از آن برای کاهش خطاهای ناشی از تداخل انرژی‌ها، استفاده از دو یا تعداد بیشتر آشکارساز و یا استفاده هم‌زمان از آشکارسازهای دیگر مثل آشکارساز نیمه‌رسانا تا حد زیادی می‌تواند در کاهش خطا مؤثر باشد و





- [1] A. Ramezanpoor, N. Arabi, Testing of concretes and cements, Amir Kabir University Publications, Tehran, (2012).
- [2] Z.B. Alfassi, M. Ghanadeih Maragheh, Chemical Analysis by Nuclear Methods, Nuclear Science and Technology Research Institute, Publications (1998).
- [3] M. Sadeghi, Simulation Analyst moment in the process of making cement conveyor line real-time gamma-ray elemental analysis of neutron activation, M.S.c. Thesis, Sharif University, (2012).
- [4] G.E. Knoll, Radiation Detectibn and Measurement, John Wiley & Sons, Inc, New York, (2000).
- [5] A.A. Naqvi, M.A. Garwan, M. Maslehuddin, M.M.Nagadi, O.S.B. Al-Amoudi, M. Raashid, Response of a PGNAА setup for pozzolan-based cement concretespecimens, *Appl. Radiat. Isotopes* (2010) 635–638.
- [6] M.I. Al-Jarallaha, A.A. Naqvia, Fazal-ur-Rehmana, M. Maselehuddinc, F. Abu-Jarada, M. Raashida, Neutron moderation in a bulksample and its effects on PGNAА setup geometry, *Radiat. Meas.* (2003) 471–474.
- [7] P. Ghorbani, E. Bayat, D. Sardari, V. Doost mohammadi, Increase the thermal neutron flux in the sample using neutron reflectors to improve PGNAА, Physics Conference of Iran No. **978**, (2011).
- [8] A.A. Naqvi, M.M. Nagadi, S. Kidwai, Khateeb-ur-Rehman, M. Maslehuddin, Search of a prompt gamma ray for chlorine analysis in a Portland cement sample, *Nucl. Instrum. Methods* (2004) 591–597.
- [9] A.A. Naqvia, M.M. Nagadib, Khateeb-ur-Rehmanb, M. Maslehuddinc, S. Kidwai, Monte Carlo simulations for design of the KFUPM PGNAА facility, *Radiat. Phys. Chem.* (2003) 89–98.
- [10] M. Ghanadeih maragheh, P. Sheir mardi, Application of radioactivity and nuclear radiation, Nuclear Science and Technology Research Institute, Publications (2011).