

بررسی اثر فعالیت چشمه‌ی گاما بر قرائت ابزار چگالی سنج هسته‌ای درون‌چاهی با استفاده از شبیه‌سازی توسط کد MCNP

مرتضی پورچیت‌ساز^۱، بابک شیرانی^{۱*} و رضا محمدی^۲

^۱ گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

^۲ شرکت ملی حفاری ایران، خوزستان، اهواز، ایران.

* اصفهان، دانشگاه اصفهان، گروه مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۸۱۷۴۶۷۳۴۴۱

پست الکترونیکی: b.shirani@ast.ui.ac.ir

چکیده

با گسترش روش‌های مختلف نمودارگیری، کاربرد نمودارها در تمام رشته‌های مرتبط با علوم زمین بیش از پیش اهمیت پیدا می‌کند. نمودارهای چاه‌پیمایی اطلاعات ضروری را برای ارزیابی کمی هیدروکربن و همچنین نوع سنگ و خصوصیات سیال درون سازند در اختیار قرار می‌دهند. از آنجا که چاه‌پیمایی از نظر تصمیم‌گیری، بخش مهمی از مراحل حفاری و تکمیل چاه‌های نفت و گاز بوده، بنابراین کسب اطلاعات دقیق و کامل از نمودار اجتناب‌ناپذیر است. ابزار چگالی‌سنج هسته‌ای نمونه‌ای از ابزارهای چاه‌نگاری هسته‌ای است که چگالی سازند و نوع لیتولوژی آن را اندازه‌گیری و شناسایی می‌کند؛ بنابراین دقت اندازه‌گیری در این ابزار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این ابزار از چشمه گاما Cs-137 استفاده شده است. تعیین چگالی و نوع لیتولوژی سازند با استفاده از برهم‌کنش‌های پراکندگی کامپتون و پدیده فوتوالکتریک پرتو گامای حاصل از چشمه با سازند اندازه‌گیری می‌شود. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی ابزار چگالی‌سنج هسته‌ای درون‌چاهی توسط کد MCNP تأثیر اثر فعالیت چشمه روی طیف انرژی خروجی برای سه سازند رس، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک با چگالی معلوم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج طیف انرژی نشان می‌دهد افزایش یا کاهش فعالیت چشمه بر دقت اندازه‌گیری تأثیرگذار است.

کلید واژگان: چاه‌نگاری، سازند، چشمه‌ی گاما، لیتولوژی، چگالی‌سنج، کد MCNP

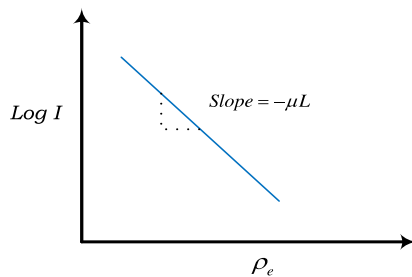
۱. مقدمه

۱.۱. ابزار چگالی‌سنج درون‌چاهی

مدارهای درونی شده و آن را از مدار خارج می‌کند و خود نیز از بین می‌رود. این پدیده فوتوالکتریک نامیده می‌شود. حال اگر انرژی پرتو از 150 KeV تا 1.02 MeV تغییر کند، در اثر برخورد پرتو با ماده بخشی از انرژی آن به صورت جنبشی به الکترون آخرین مدار داده می‌شود و آن را به خارج از اتم

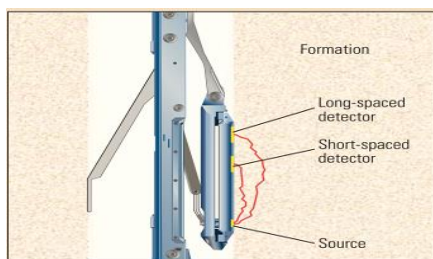
در آغاز نگاهی گذرا به انتشار پرتوهای گاما در سازند و برهم‌کنش‌های آن می‌اندازیم. در صورتی که انرژی پرتوهای گاما کم‌تر از 150 KeV باشد، برخورد پرتو با اتم موجب انتقال تمام انرژی پرتوگاما به صورت جنبشی به الکترون

در نتیجه انرژی پرتوهای گاما کاهش یافته و نهایتاً در اثر پدیده فوتوالکتریک جذب می‌شوند؛ بنابراین با افزایش چگالی سازند، تعداد برخوردها و گاماهاى جذب شده بیش‌تر می‌شود و گاماهاى کم‌تری توسط گیرنده ثبت می‌شود. پس از طریق اندازه‌گیری تعداد گاماهاى دریافتی می‌توان ρ_e و به تبع چگالی سازند را تعیین کرد.



شکل (۱): چگالی الکترونی برحسب میزان پرتوهای رسیده به آشکارساز [۱].

این ابزار از دو آشکارساز NaI با ابعاد $5.8 \times 3.8 \text{ cm}$ و $2.5 \times 2.5 \text{ cm}$ یک چشمه گاما Cs-137 به‌عنوان چشمه‌ی اصلی با اکتیویته ۲ کوری و یک چشمه Cs-137 با اکتیویته 0.08 میکروکوری برای کالیبراسیون آشکارساز استفاده شده است. ابزار فوق که در شکل (۲) نشان داده شده است، دارای یک بازوی متحرک می‌باشد که دو وظیفه‌ی مهم بر عهده دارد. باز شدن بازو باعث چسبیدن آشکارسازها به دیواره چاه می‌شود، هم‌چنین این بازوی متحرک وظیفه اندازه‌گیری قطر چاه را نیز بر عهده دارد. اطلاعات آشکارسازها و بازوی متحرک توسط کابل نمودارگیری به سیستم سطحی انتقال داده شده و اطلاعات به صورت نمودار از سیستم قابل مشاهده می‌باشد [۲].



شکل (۲): ابزار چگالی‌سنج درون‌چاهی [۳].

می‌فرستد و بخش دیگر به فرم فوتون انتشاری با انحراف از مسیر اصلی به حرکت خود ادامه می‌دهد. این پدیده پراکندگی کامپتون نامیده می‌شود. توجه کنید که این فوتون در نهایت یا در اثر پدیده جذب فوتوالکتریک از بین می‌رود و یا جذب آشکارساز ابزار می‌شود. آخرین حالت که پدیده تولید زوج نامیده می‌شود، زمانی رخ می‌دهد که انرژی پرتو بیش‌تر از 1.02 MeV باشد و نتیجه آن تولید زوج الکترون - پوزیترون است؛ بنابراین از میان این سه برهم‌کنش تنها پدیده‌ی پراکندگی کامپتون اساس چاه‌نگاری جرم مخصوص را تشکیل می‌دهد، زیرا نوع انتشار و برهم‌کنش آن به‌طور مستقیم با چگالی الکترونی سازند ارتباط دارد. ارتباط میان چگالی الکترونی سازند و پرتوهای رسیده به آشکارساز توسط رابطه بیان می‌شود [۱]

$$I = I_0 e^{-\mu_p L} \quad (1)$$

که در آن، I_0 و I ، به ترتیب شدت پرتو گاما ارسالی (توسط چشمه) و دریافتی (توسط آشکارساز)، μ ، ضریب جذب ماده که به ساختار ابزار، انرژی پرتوهای گامای ارسالی و ویژگی‌های گیرنده وابسته است، ρ_e ، چگالی الکترونی سازنده در بازه L ، L ، فاصله میان چشمه و آشکارساز (بازه).

همان‌طور که از رابطه (۱) مشخص است برای تعیین ρ_e چگالی الکترونی سازند باید شدت پرتوهای گاما و میزان تضعیف آن را اندازه‌گیری کرد و تنها پدیده‌ای که شرایط را برای اندازه‌گیری تضعیف پرتوهای گاما فراهم می‌آورد، کامپتون است. از سوی دیگر عدد اتمی در سنگ‌های رسوبی حداکثر ۱۶ است و مطابق شکل (۳) در این بازه از عدد اتمی (از ۱ تا ۱۶) پدیده غالب پراکندگی کامپتون است؛ بنابراین ابزار جرم مخصوص با اندازه‌گیری شدت پرتوهای گامای پراکنده شده توسط آشکارساز ابزار، چگالی محیطی را تعیین می‌کند. بدین صورت که هر چه چگالی سازند بیش‌تر باشد، تعداد برخورد پرتوهای گاما با الکترون‌های سازند افزایش می‌یابد و

۲. روش‌ها

۱.۲. روش اندازه‌گیری چگالی در ابزار چگالی سنج

درون‌چاهی

جهت محاسبه چگالی در ابزار چگالی‌سنج درون‌چاهی از رابطه زیر استفاده شده است:

$$C = I_0 e^{-a\mu x \rho_b} \quad (2)$$

C = نرخ شمارش دریافتی از آشکارساز

I_0 = شدت چشمه

μ = ضریب تضعیف پرتوگاما

x = فاصله‌ی چشمه تا آشکارساز

ρ_e = چگالی الکترونی سازند

a = عدد ثابت

رابطه را به صورت زیر ساده می‌کنیم:

$$\ln C = \ln I_0 + \ln e^{-a\mu x \rho_b} \quad (3)$$

$$\ln C = \ln I_0 - a\mu x \rho_b \quad (4)$$

$$\rho_b = \frac{1}{a\mu x} \ln I_0 - \frac{1}{a\mu x} \ln C \quad (5)$$

با توجه به روابط بالا چگالی الکترونی به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌گردد [۴]:

$$\rho_b = \frac{1}{a\mu x} \ln I_0 - \frac{1}{a\mu x} \ln C \quad (6)$$

$$\frac{\ln I_0}{a\mu x} = A \quad (7)$$

$$\frac{1}{a\mu x} = B \quad (8)$$

به دلیل این‌که چگالی سازند با پراکندگی کامپتون متناسب است، در طیف دریافتی از آشکارساز نرخ شمارش در محدوده کامپتون را محاسبه کرده و در رابطه‌ی بالا قرار می‌دهیم. جهت انجام این کار دو سازند را با چگالی معلوم انتخاب می‌نماییم؛

که در این تحقیق از سازند سنگ‌آهک با چگالی $2.71 \frac{g}{cm^3}$ و

رس با چگالی $2.3 \frac{g}{cm^3}$ استفاده شده است.

سپس نرخ شمارش آشکارساز در محدوده کامپتون مربوط به هر سازند و چگالی آن‌ها را در رابطه زیر قرار داده و مقادیر A و B را به صورت دو معادله و دو مجهول محاسبه می‌کنیم:

$$\rho_{b_1} = A - B \ln C \quad (9)$$

$$\rho_{b_2} = A - B \ln C \quad (10)$$

سپس با معلوم بودن مقادیر A و B نرخ شمارش سازند سوم را با چگالی مجهول در رابطه زیر قرار داده و چگالی آن را محاسبه می‌کنیم.

$$\rho_b = A - B \ln C \quad (11)$$

۲.۲. روش تعیین لیتولوژی سازند

در ابزارهای جدید چگالی‌سنج درون‌چاهی آنالیز طیف انرژی در محدوده‌ی انرژی‌های پایین به ابزار، جهت تعیین لیتولوژی سازند اضافه شده است. همان‌گونه که در گفته شد، برهم‌کنش‌های پرتوی گاما با مواد به سه دسته فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج تقسیم می‌شوند؛ که در ابزار چگالی‌سنج هسته‌ای، برای سنجش چگالی از برهم‌کنش کامپتون استفاده گردید. برهم‌کنش فوتوالکتریک که احتمال وقوع آن به مقدار انرژی پرتوگاما و عدد اتمی ماده جاذب بستگی دارد جهت تعیین لیتولوژی سازند استفاده می‌شود. سطح مقطع فوتوالکتریک از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است. [۴]

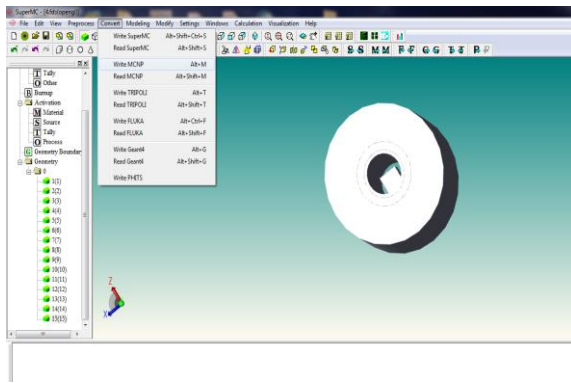
$$\delta_{photo} = C \frac{Z^{4.6}}{E^{3.15}} \quad (12)$$

که در آن:

δ_{photo} = سطح مقطع برهم‌کنش فوتوالکتریک

C = عدد ثابت

Z = عدد اتمی ماده جاذب

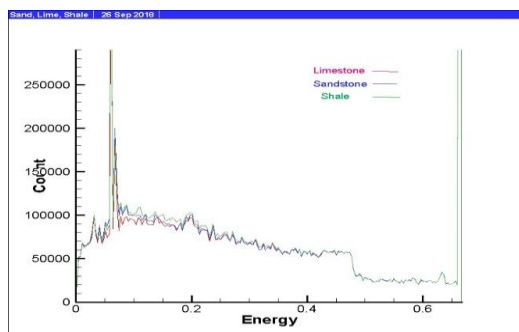


شکل (۴): فراخوان هندسه طراحی شده در نرم‌افزار Super MC[8] و تبدیل آن به کد [5] MCNP.

پس از تعریف مواد و چشمه در نرم‌افزار Super MC[7]، وردی کد [5] MCNP را از آن استخراج می‌نماییم.

۴.۲. روش شبیه‌سازی مسئله

کد [5] MCNP را از نرم‌افزار Super MC[7] دریافت کرده و سه سازند رس، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک را برای چاه آزمایشی شبیه‌سازی شده در نظر می‌گیریم. برای انجام آزمایش به دلیل نیاز به طیف ارتفاع پالس از تالی F8 در کد [5] MCNP استفاده شده است. پس از شروع طیف ارتفاع پالس حاصل از سازندهای رس، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک را دریافت می‌نماییم. لازم به ذکر است همان‌گونه که در (۱) بیان شد ابزار از دو آشکارساز NaI دور و نزدیک تشکیل شده است که از آشکارساز نزدیک جهت حذف اثر گل حفاری استفاده شده است. در این آزمایش به علت عدم وجود گل، طیف ارتفاع پالس، حاصل از آشکارساز دور می‌باشد. دمای چاه در این آزمایش ۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): طیف ارتفاع پالس حاصل از سازندهای رس، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک.

$E =$ انرژی پرتوگاما

سطح مقطع برهم‌کنش کامپتون نیز از رابطه زیر قابل

محاسبه است:

$$\delta_{compton} = Z\delta_c \quad (13)$$

که در آن:

$\delta_{compton}$ = سطح مقطع برهم‌کنش کامپتون

Z = عدد اتمی ماده جاذب

δ_c = سطح مقطع برهم‌کنش کامپتون برای یک الکترون

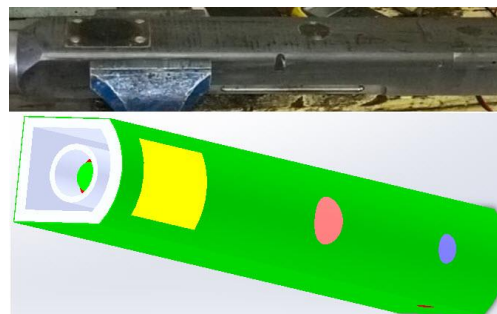
با توجه به روابط (۱۱) و (۱۲) فاکتور فوتوالکتریک از

تقسیم $\frac{\delta_{photo}}{\delta_{compton}}$ و ساده‌سازی آن از (۱۳) قابل محاسبه است:

$$P_e = \left(\frac{Z_{eff}}{10} \right)^{3.6} \quad (14)$$

۳.۲. شبیه‌سازی هندسه آزمایش

برای شبیه‌سازی ابزار توسط کد [5] MCNP ابتدا باید هندسه آن را تعریف کرد. به علت پیچیدگی هندسی ابزار امکان تعریف آن به صورت دستی وجود نداشت، لذا ابتدا قسمت‌های مختلف آن توسط نرم‌افزار Solid Work[6] طراحی شده، سپس یک چاه آزمایشی به قطر داخلی ۸ اینچ و قطر خارجی ۲۰ اینچ جهت انجام آزمایش طراحی و پس از قرار گرفتن ابزار چگالی‌سنج طراحی شده درون چاه آزمایشی، با استفاده از رابط گرافیکی [7] Super MC [هندسه طراحی شده تبدیل فرمت و ورودی به کد [5] MCNP گردید.



شکل (۳): تصویر واقعی ابزار و هندسه طراحی شده در [6] Solid

Work

با افزایش فعالیت چشمه در محدوده‌ی کامپتون در شکل (۸) نشان داده شده‌اند.

جدول (۱): شمارش پرتوهای رسیده به آشکارساز در محدوده‌ی فوتوالکتریک و کامپتون برای سازند سنگ آهک.

فعالیت برحسب بکرل (Bq)	شمارش در محدوده‌ی کامپتون 200-500 keV	شمارش در محدوده‌ی فوتوالکتریک 50-100 keV
3.7E+10	3.9E+05	1.0E+05
4.8E+10	5.1E+05	1.3E+05
5.9E+10	6.2E+05	1.6E+05
7.0E+10	7.4E+05	1.9E+05
8.2E+10	8.7E+05	2.3E+05
9.2E+10	9.8E+05	2.5E+05

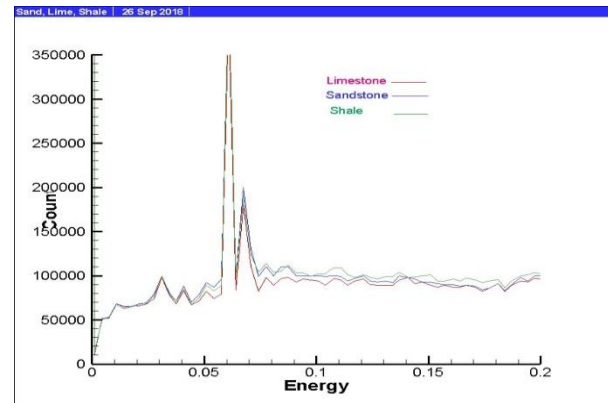
جدول (۲): شمارش پرتوهای رسیده به آشکارساز در محدوده‌ی فوتوالکتریک و کامپتون برای سازند ماسه سنگ.

فعالیت برحسب بکرل (Bq)	شمارش در محدوده‌ی کامپتون 200-500 keV	شمارش در محدوده‌ی فوتوالکتریک 50-100 keV
3.7E+10	3.9E+05	1.0E+05
4.8E+10	5.1E+05	1.3E+05
5.9E+10	6.3E+05	1.6E+05
7.0E+10	7.5E+05	1.9E+05
8.2E+10	8.8E+05	2.3E+05
9.2E+10	9.9E+05	2.5E+05

جدول (۳): شمارش پرتوهای رسیده به آشکارساز در محدوده‌ی فوتوالکتریک و کامپتون برای سازند رس.

فعالیت برحسب بکرل (Bq)	شمارش در محدوده‌ی کامپتون 200-500 keV	شمارش در محدوده‌ی فوتوالکتریک 50-100 keV
3.7E+10	4.2E+05	1.3E+05
4.8E+10	5.4E+05	1.6E+05
5.9E+10	6.7E+05	2.0E+05
7.0E+10	7.9E+05	2.4E+05
8.2E+10	9.3E+05	2.8E+05
9.2E+10	1.0E+06	3.1E+05

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود ناحیه ۵۰۰-۲۰۰ الکترون ولت محدوده‌ی کامپتون را نشان می‌دهد؛ که نمودارها برای سه سازند نزدیک به یکدیگر می‌باشد، علت آن نزدیکی مقدار چگالی سه سازند به یکدیگر است. محاسبه چگالی توسط رابطه (۱۱) انجام می‌شود.



شکل (۶): طیف ارتفاع پالس حاصل از سازندهای رس، ماسه سنگ و سنگ آهک در ناحیه فوتوالکتریک.

شکل (۶) طیف ارتفاع پالس در ناحیه فوتوالکتریک را نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود. به علت اختلاف در عدد اتمی مؤثر بین سه سازند مورد آزمایش و به دلیل این‌که برهم‌کنش فوتوالکتریک به‌طور مستقیم با عدد اتمی مؤثر سازند مرتبط است، در ناحیه فوتوالکتریک که بین ۱۰۰-۵۰ کیلو الکترون ولت می‌باشد اختلاف در نمودارها قابل مشاهده است. طیف ارتفاع پالس در ناحیه فوتوالکتریک با توجه به نزدیک بودن چگالی آن‌ها به یکدیگر جهت تعیین لیتولوژی مورد استفاده قرار گرفته است. جهت بررسی اثر فعالیت چشمه، با توجه به طیف انرژی حاصل از کد MCNP [۵] در دو ناحیه فوتوالکتریک و کامپتون برای سه سازند رس، ماسه سنگ و سنگ آهک در جدول (۱)، جدول (۲) و جدول (۳) مورد بررسی قرار گرفته است.

نمودار تغییرات شمارش با افزایش فعالیت چشمه در محدوده‌ی فوتوالکتریک در شکل (۷) و نمودار تغییرات شمارش

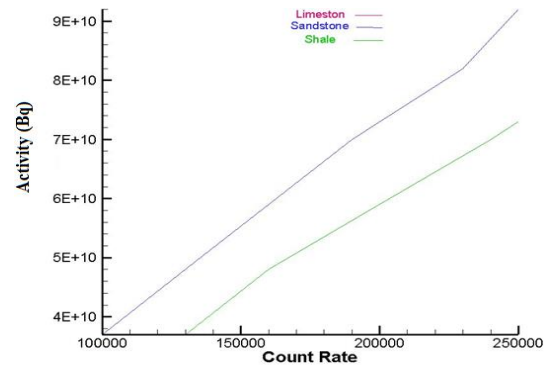
برای سه سازند رس با چگالی $2.23 \frac{g}{cm^3}$ ، ماسه‌سنگ با چگالی $2.65 \frac{g}{cm^3}$ و سنگ‌آهک با چگالی $2.71 \frac{g}{cm^3}$ مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده می‌شود با افزایش فعالیت چشمه با توجه به اختلاف کم میان چگالی سازندها تفاوت میان پرتوهای رسیده به آشکارساز بیش‌تر می‌شود. در نتیجه دقت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. در ناحیه فوتوالکتریک هم به دلیل تفاوت عدد اتمی مؤثر سازندها با یکدیگر، در جدول (۱)، جدول (۲) و جدول (۳) اثر افزایش فعالیت بر قرائت آشکارساز قابل مشاهده است. نکته قابل توجه در این تحقیق، در نظر گرفتن نیمه‌عمر چشمه در ابزار چگالی‌سنج می‌باشد که می‌توان تأثیر آن را با کالیبراسیون ابزار و اندازه‌گیری چشمه در زمان‌های مشخص بر دقت اندازه‌گیری ابزار تعیین نمود.

۴. قدردانی

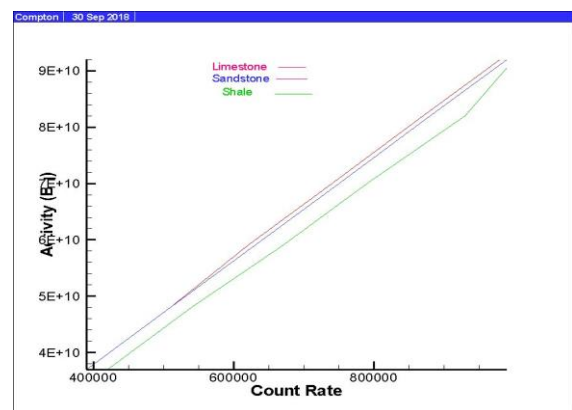
نویسندگان مراتب قدردانی خود را از مجموعه‌ی معظم شرکت ملی حفاری ایران، مدیریت محترم خدمات ویژه‌ی حفاری به سبب مساعدت‌ها و از همکاران ارجمند آقایان مهندس مجید فاتحی و مهندس مرتضی مهدی‌سازان که همکاری بی‌دریغ خود را در راستای به انجام رساندن پژوهش فوق‌مذکور داشته‌اند تشکر نموده؛ هم‌چنین از گروه تحقیقاتی FDS[۷] به دلیل همکاری نرم‌افزاری قدردانی می‌نمایند.

[۱] م. کامیاب. ش. پرچه‌خواری؛ چاه‌نگاری، اصول، ابزارها و تفسیر پتروفیزیکی داده‌ها. نشر ترآوا اهواز، ۱۳۹۲.

- [2] R. Group, "LITHO-DENSITY LOGGING TOOL(ZDT)," ed, 2010.
- [3] M. A. Andersen, B. Duncan and R. J. O. R. McLin, "Core truth in formation evaluation," vol. 25 No. 2 pp. 16-25, 2013.
- [4] Halliberton, "Spectral Density Log Tool (SDLT),"



شکل (۷): نمودار تغییرات شمارش با افزایش فعالیت چشمه در محدوده فوتوالکتریک.



شکل (۸): نمودار تغییرات شمارش با افزایش فعالیت چشمه در محدوده کامپتون.

۳. نتیجه‌گیری

همان‌گونه که در جدول (۱)، جدول (۲) و جدول (۳) مشاهده می‌شود تغییرات پرتوهای رسیده به آشکارساز در دو ناحیه فوتوالکتریک در محدوده‌ی ۵۰-۱۰۰ کیلو الکترون ولت و کامپتون ۲۰۰-۵۰۰ کیلو الکترون ولت با میزان فعالیت چشمه گاما CS-137 در محدوده‌ی 3.7E+10 Bq تا 9.2E+10 Bq

۷. مراجع

- ed, 1992.
- [5] L. S. J. L. A. N. L. Waters, "MCNPX user's manual," 2002.
- [6] D. Planchard, SOLIDWORKS 2017 Reference Guide. SDC Publications, 2017.
- [7] F. Team. (2014). Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences. Available: <http://www.fds.org.cn/en/other/fds.asp>