

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

گروه هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد

اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از پرتوهای گاما و شبیه‌سازی آن به روش

مونت کارلو

استاد راهنما:

دکتر حسین توکلی عنبران

نگارش:

طاهره عباس آباد عربی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۰

ب

تقدیم به:

آستان پر مهر پروردگارم که مرا در آغوش لایزال خویش پروراند و در تنهاییهایم جانشین همه نداشتن‌هایم بوده است، برای آنکه شایستگی سالم زیستن را به من عطا کرد و شوق آموختن را همراه در من زنده نگاه داشت و من همیشه وامدار نگاه پر مهر او خواهم بود.

ایمان دارم که نه تنها زبان بلکه اگر بندبند وجودم و تک تک سلولهای پیکرم زبانی برای سپاسگذاری از وسعت بیانت‌هایش می‌شدند، باز هم قطره‌های ناچیز غرق در اقیانوس بیکرانه الطاف او بودم.

تقدیم به:

آنهایی که سپید مو گشتند تا من رو سپید باشم.

گامهای زندگیشان لرزان شد تا من استوارتر گام بردارم.

و قامتشان خمید تا من راست قامت باشم.

تقدیم به پدرم اسطوره جوانمردی زندگیم و مادرم که صبر از وجودش استقامت آموخت.

تقدیم به استاد گرامی‌ام:

که به من یاد داد چگونه برای به خدا نزدیک شدن از خود فاصله بگیرم، چگونه برای ماندگار شدن نعمت‌هایم آنچه را که دوست دارم به دیگران هدیه کنم و چگونه برای آزاد شدن از خود بنده خدا شوم.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حسین توکلی عنبران که اگر یاری و لطف بیکرانه ایشان نمی‌بود این امر به سرانجام نمی‌رسید تشکر کنم.

و نیز از دوستان بزرگوارم سرکار خانم فریده جمالی کارشناس ارشد فیزیک پزشکی دانشگاه علوم پزشکی تبریز و همچنین خانم‌ها زهرا خراسانی نژاد و صفیه کلابی و همه کسانی که در این راه محبتشان را از من دریغ نداشتند و صمیمانه یاریم نمودند سپاسگزارم.

امیدوارم مطالبی که در ادامه ذکر می‌شود توشه راهی هر چند ناچیز برای همه مشتاقان راه دانش باشد.

چکیده

پرتوهای گاما به طور عمده از طریق سه برهم‌کنش فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج، با ماده اندرکنش انجام می‌دهند که در نهایت منجر به جذب پرتوهای گاما در ماده می‌شوند. در این تحقیق از دو روش تضعیف پرتوهای گاما و پس‌پراکندگی آنها از سطح خاک برای اندازه‌گیری رطوبت استفاده شده است. میزان تضعیف و پراکندگی پرتوهای گاما در خاک به انرژی آنها، چگالی و ضخامت خاک وابسته است. اگر انرژی پرتوها و ضخامت خاک ثابت بماند تنها عامل موثر در میزان تضعیف و پراکندگی پرتوها، چگالی خاک است و چگالی به مقدار رطوبت موجود در خاک بستگی دارد. پس می‌توان از روی تضعیف و یا پس‌پراکندگی پرتوها در خاک، رطوبت آن را اندازه گرفت.

کد MCNP-4C کدی چند منظوره است که برای ترابرد الکترون، فوتون و نوترون استفاده می‌شود. در این کد تمام برهم‌کنش‌های پرتوی گاما با ماده از قبیل پراکندگی‌های همدوس و ناهمدوس و فرایندهای جذب همگی با استفاده از روش مونت‌کارلو شبیه‌سازی شده است. در این کار ابتدا با شبیه‌سازی مونت‌کارلوی آزمایش با کد MCNP-4C حالت بهینه برای سیستم اندازه‌گیری رطوبت خاک (برای هر دو روش تضعیف و پس‌پراکندگی) بدست آورده شد و بعد از آن بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو اقدام به انجام آزمایشهای مربوطه شد.

در اندازه‌گیری رطوبت به روش تضعیف، ابتدا برای چند انرژی و رطوبت، شبیه‌سازی‌های مربوطه انجام شد و بعد از بدست آوردن نتایج مطلوب، شبیه‌سازی‌های مشابه‌ای برای چشمه‌های واقعی موجود در آزمایشگاه انجام شد و در نتیجه آن چشمه ^{60}Co به عنوان بهترین چشمه برای انجام کار تجربی انتخاب شد و در پایان اثر ظرف خاک در اندازه‌گیری رطوبت به روش تضعیف بررسی شد.

در اندازه‌گیری به روش پس‌پراکندگی ابتدا با شبیه‌سازی سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک، اقدام به انتخاب چشمه‌ی ^{241}Am به عنوان چشمه‌ی بهینه شد. در این فرایند کمیتی به نام کنتراست معرفی و مشخص شد که با افزایش رطوبت کنتراست به صورت خطی افزایش می‌یابد و در نتیجه مشخص شد که می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده کرد. همچنین فاصله بهینه چشمه و آشکارساز از سطح خاک با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بدست آمد. سپس با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمایشهای مربوطه انجام شد. در نهایت تطبیق نسبتاً خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و نتایج تجربی مشاهده شد.

مقالات مستخرج

۱- عباس آباد عربی، ط و توکلی عنبران، ح “محاسبه رطوبت خاک با استفاده از پرتوهای گاما به

روش شبیه‌سازی مونت کارلو” ، هفدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، اصفهان، ۱۳۸۹

۲- عباس آباد عربی، ط و توکلی عنبران، ح. “اثر ظرف در اندازه‌گیری رطوبت خاک با پرتوهای گاما به

روش شبیه‌سازی مونت کارلو” دوازدهمین کنگره خاک، تبریز، ۱۳۹۰

۳- عباس آباد عربی، ط و توکلی عنبران، ح “محاسبه رطوبت خاک با استفاده از پس‌پراکندگی

پرتوهای گاما، با روش مونت کارلو” کنفرانس فیزیک ایران، ارومیه، ۱۳۹۰

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول : برهم کنش پرتوی گاما با ماده
۲	مقدمه.....
۲	۱-۱ تابش.....
۲	۲-۱ طیف آماری.....
۳	۳-۱ برهم کنش پرتوگاما با ماده.....
۴	۱-۳-۱ پراکندگی کامپتون.....
۷	۲-۳-۱ سطح مقطع پراکندگی کامپتون.....
۸	۳-۳-۱ فوتوالکتریک.....
۹	۴-۳-۱ سطح مقطع پدیده فوتوالکتریک.....
۱۰	۳-۱ ۵- تولید زوج.....
۱۲	۶-۳-۱ سطح مقطع پدیده تولید زوج.....
۱۲	۴-۱ ضریب تضعیف کل.....

فصل دوم: شبیه سازی مونت کارلو و کد MCNP- 4C

۱۷	مقدمه.....
۱۸	۱-۲ فرایندهای آماری و شبیه سازی مونت کارلو.....
۱۸	۲-۲ تاریخچه روش مونت کارلو.....
۲۰	۳-۲ ساختار MCNP.....
۲۱	۴-۲ تاریخچه MCNP.....
۲۳	۵-۲ خطای آماری اندازه گیری تابش ها.....

فصل سوم: اندازه گیری رطوبت

۲۶	مقدمه.....
۲۶	۱-۳ روش های اندازه گیری رطوبت.....
۲۸	۱-۱-۳ تانسئومتر.....
۲۹	۲-۱-۳ روش حجمی.....
۲۹	۱-۲-۱-۳ نوترون متر.....
۳۱	۲-۲-۱-۳ انعکاس سنجی حوزه زمانی (TDR).....
۳۳	۲-۳ محاسبه رطوبت به روش تضعیف پرتو های گاما با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو با کد MCNP-4C.....

۳۳	.....۱-۲-۳ تضعیف پرتو گاما توسط خاک
۳۷	.....۲-۲-۳ شبیه سازی با کد MCNP- 4C و بدست آوردن رطوبت از روش تضعیف
۴۳	.....۳-۲-۳ محاسبه رطوبت خاک با چشمه‌های موجود در آزمایشگاه
۴۷	.....۴-۲-۳ اثر ظرف در محاسبه رطوبت و شبیه‌سازی آن
۵۰	.....۳-۳ محاسبه رطوبت خاک با استفاده از پس‌پراکندگی پرتوهای گاما
۵۱	.....۱-۳-۳ شبیه‌سازی مسئله با کد MCNP- 4C
۵۵	.....۲-۳-۳ رابطه بین کنتراست و رطوبت
۶۰	.....۳-۳-۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی
۶۵	.....۴-۳-۳ چشمه واقعی
۷۲	.....۵-۳-۳ آشکارساز واقعی
۷۵	.....۶-۳-۳ خاک جدید
۷۶	.....۷-۳-۳ بررسی اثر هوا

فصل چهارم: کار آزمایشگاهی

۷۹	.....۱-۴ اندازه‌گیری رطوبت به روش تضعیف
۸۲	.....۲-۴ اندازه‌گیری رطوبت از روی پرتوهای پس‌پراکنده شده از سطح خاک
۸۷	.....نتیجه‌گیری
۸۹	.....مراجع
۹۱	.....پیوست‌ها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ اثر کامپتون..... ۴
- شکل ۲-۱ فرایند فوتوالکتریک..... ۸
- شکل ۳-۱ فرایند تولید زوج در مجاورت هسته..... ۱۰
- شکل ۴-۱ اهمیت نسبی سه برهم‌کنش پرتو گاما..... ۱۳
- شکل ۵-۱ ضرایب تضعیف جرمی برای سرب ($\rho = 11.34 \text{ g. cm}^{-3}$ و $Z = 82$)..... ۱۴
- شکل ۱-۲ رابطه زمان حل مسئله با پیچیدگی آن..... ۱۷
- شکل ۱-۳ روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک..... ۲۷
- شکل ۲-۳ ساختمان تانسیومتر..... ۲۹
- شکل ۳-۳ ساختمان نوترون متر..... ۳۰
- شکل ۴-۳ ساختمان TDR..... ۳۲
- شکل ۵-۳ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش تضعیف..... ۳۷
- شکل ۶-۳ نمودار (A) و (B) به ترتیب ضریب تضعیف خطی خاک و پویش آزاد متوسط بر حسب انرژی پرتو گاما برای رطوبت‌های متفاوت خاک است..... ۴۳
- شکل ۷-۳ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وقتی برای خاک ظرف در نظر گرفته می‌شود..... ۴۸
- شکل ۸-۳ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی پرتوهای پراکنده شده از سطح خاک..... ۵۲
- شکل ۹-۳ نمودار مقایسه کنتراست مربوط به تالی F8 بر حسب انرژی برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co فاصله چشمه- آشکارساز سطح خاک 1 cm..... ۵۲
- شکل ۱۰-۳ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی پرتوهای پراکنده شده از سطح خاک، محیط خلاء و برای آشکارساز یک موازی‌ساز طراحی شده است..... ۵۳
- شکل ۱۱-۳ نمودار کنتراست تالی F8 بر حسب انرژی برای ^{241}Am با طراحی موازی‌ساز برای آشکارساز..... ۵۴
- شکل ۱۲-۳ نمودار کنتراست تالی F8 بر حسب انرژی بین رطوبت اولیه 0.01% و رطوبت‌های مشخص شده در شکل..... ۵۴
- شکل ۱۳-۳ نمودار F8 بر حسب انرژی در رطوبت 2.568% را نشان می‌دهد که در آن ناحیه‌ی مربوط به قله پراکندگی یگانه مشخص شده است..... ۶۱
- شکل ۱۴-۳ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک، وقتی کنتراست توسط انتگرال گیری از خود نمودار، خطی راست با شیب 0.75 ± 0.04 ۶۳
- شکل ۱۵-۳ نمودار تغییرات C (کنتراست از روی مساحت نمودار برازش شده در ناحیه مورد نظر بدست می‌آید) بر حسب رطوبت خاک خطی راست با شیب 1.0608 ± 0.07 ۶۴
- شکل ۱۶-۳ سیستم در نظر گرفته شده برای اندازه‌گیری رطوبت آجر، که چشمه ^{241}Am کنار آشکارساز و داخل یک موازی‌ساز قرار دارد..... ۶۵
- شکل ۱۷-۳ نمودار تغییرات C (کنتراست از روی مساحت نمودار برازش شده در ناحیه مورد نظر بدست می‌آید) بر حسب رطوبت خاک..... ۶۶

شکل ۳-۱۸ تالی F8 بر حسب انرژی، در نمودار (A) قله پس پراکندگی دیده نمی‌شود و نمودار (B) بازه F8 را کم کرده تا قله پراکندگی یگانه دیده شود.....۶۷

شکل ۳-۱۹ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی پرتوهای پراکنده شده از سطح خاک، محیط خلاء و چشمه کنار آشکارساز.....۶۸

شکل ۳-۲۰ تالی F8 بر حسب انرژی، همان‌طور که ملاحظه می‌شود سطح قله فتوپیک خیلی پایین آمده است.....۶۸

شکل ۳-۲۱ نمودار تغییرات C (کنتراست از روی مساحت نمودار برازش شده در ناحیه مورد نظر بدست می‌آید) بر حسب رطوبت خاک.....۶۹

شکل ۳-۲۲ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک برای چهار حالت A- چشمه همسانگرد مسطح B- چشمه همسانگرد مسطح داخل حفاظ C- چشمه موازی D- چشمه موازی به صورت یک استوانه.....۷۰

شکل ۳-۲۳ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک وقتی آشکارساز در فاصله 5 cm و چشمه در فاصله 0.6 cm از سطح خاک قرار دارند.....۷۱

شکل ۳-۲۴ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک برای وقتی که ضخامت حفاظ چشمه زیاد شود.....۷۱

شکل ۳-۲۵ نمودار کنتراست بر حسب رطوبت وقتی فاصله آشکارساز از سطح خاک 0.6 cm و چشمه در مرکز پنجره آشکارساز قرار دارد.....۷۲

شکل ۳-۲۶ طرحی از آشکارساز بعد از شبیه‌سازی و هر لایه با یک رنگ مجزا مشخص شده است و بلور آشکار ساز در مرکز قرار دارد.....۷۳

شکل ۳-۲۷ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک بعد از شبیه‌سازی آشکارساز واقعی در فایل وردی با شیب 0.82 ± 0.07۷۴

شکل ۳-۲۸ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت برای خاک جدید با شیب 0.85 ± 0.03۷۶

شکل ۳-۲۹ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک جدید وقتی اثر هوا را در نظر بگیریم با شیب 0.98 ± 0.06۷۶

شکل ۴-۱ سامانه طراحی شده برای اندازه‌گیری رطوبت وقتی لوله آزمایش خالی است.....۷۹

شکل ۴-۲ سامانه طراحی شده برای اندازه‌گیری رطوبت (A) حفاظی که چشمه‌ها داخل آن قرار دارند (B) حفاظ مربوط به لوله آزمایش (C) حفاظ مربوط به آشکارساز که در کل آزمایش ثابت است (D) کل سامانه داخل حفاظ و ترتیب قرار گرفتن سه قسمت روی هم.....۸۰

شکل ۴-۳ سامانه طراحی شده برای اندازه‌گیری رطوبت به روش پس پراکندگی.....۸۴

شکل ۴-۴ طیف مربوط به رطوبت $\theta_m = 0.03$ ، طیف زمینه از آن کم نشده است و قله پراکندگی یگانه در کانال 380 ایجاد شده است.....۸۵

شکل ۴-۴ نمودار کنتراست بر حسب رطوبت نموداری خطی با شیب 0.3149 ± 0.0098۸۶

فهرست جداول

۳۷	جدول ۳-۱ کسر وزنی عناصر موجود در نمونه خاک مورد مطالعه.....
۳۷	جدول ۳-۲ مشخصه‌های خاک تجربی.....
۳۹	جدول ۳-۳ مقادیر $\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s$ در انرژی‌های مختلف.....
۴۱	جدول ۳-۴ چگالی‌های جدید خاک بعد از افزایش رطوبت.....
۴۱	جدول ۳-۵ کسر وزنی جدید بعد افزایش رطوبت.....
۴۱	جدول ۳-۶ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده با چشمه‌ای به انرژی (0.05 MeV).....
۴۲	جدول ۳-۷ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده با چشمه‌ای به انرژی (0.1 MeV).....
۴۲	جدول ۳-۸ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده با چشمه‌ای به انرژی (0.5 MeV).....
۴۴	جدول ۳-۹ چشمه‌های مورد مطالعه.....
۴۵	جدول ۳-۱۰ مقادیر $\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s$ برای چشمه‌های مختلف.....
۴۵	جدول ۳-۱۱ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده برای چشمه‌ی ^{241}Am
۴۵	جدول ۳-۱۲ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده برای چشمه‌ی ^{137}Cs
۴۶	جدول ۳-۱۳ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده برای چشمه‌ی ^{85}Zn
۴۶	جدول ۳-۱۴ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده برای چشمه‌ی ^{22}Na
۴۶	جدول ۳-۱۵ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده برای چشمه‌ی ^{60}Co
۴۷	جدول ۳-۱۶ میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده برای چشمه‌ی ^{192}Ir
	جدول ۳-۱۷ مقادیر شار سطحی (F2) در دو حالت به همراه شار تضعیف شده ناشی از حضور ظرف برای دو چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co
۴۹	جدول ۳-۱۸ مقایسه میزان دقت کد در تشخیص رطوبت و خطای ناشی از اثر ظرف با چشمه ^{137}Cs
۵۰	جدول ۳-۱۹ مقایسه میزان دقت کد در تشخیص رطوبت و خطای ناشی از اثر ظرف با چشمه ^{60}Co
۶۲	جدول ۳-۲۰ مقادیر بدست آمده برای C همراه با خطای آن در رطوبت‌های مختلف.....
۶۴	جدول ۳-۲۱ مقادیر بدست آمده برای C از روی نمودار برازش شده همراه با خطای آن در رطوبت‌های مختلف.....
۷۵	جدول ۳-۲۲ کسر وزنی‌های خاک جدید.....
۸۱	جدول ۴-۱ مساحت مربوط به قله فوتوپیک در رطوبت‌های مختلف.....
۸۲	جدول ۴-۲ مقادیر I_{II} و I_{tot} در رطوبت‌های مختلف.....
۸۲	جدول ۴-۳ نسب ضریب انباشت در هر رطوبت به حالت خشک.....
۸۳	جدول ۴-۴ مقادیر بدست آمده برای $\Delta\theta_v$
۸۵	جدول ۴-۵ مقادیر مربوط به مساحت زیر قله فوتوپیک در رطوبت‌های مختلف همراه با خطا.....
۸۶	جدول ۴-۶ مقادیر کنتراست بر حسب رطوبت.....



فصل اول

برهم کنش پرتوی گاما با ماده

مقدمه

تابش گاما، تابشی الکترومغناطیسی است که در مقایسه با طیف نور مرئی (m 10^{-7} تا 10^{-6}) دارای طول موج خیلی کوتاهتری است (m 10^{-15} تا 10^{-11}). بر اساس نظریه کوانتمی، تابش الکترومغناطیسی را می-توان به صورت کوانتا یا فوتون‌هایی تلقی کرد که انرژی آن‌ها از معادله زیر تبعیت می‌کند.

$$E = \frac{h\nu}{\lambda} \quad (1-1)$$

پرتوهای گاما در عبور از ماده، تمام یا مقداری از این انرژی را به جا می‌گذارند.

۱-۱ تابش

کلمه تابش تا حدود سال 1900 برای توصیف امواج الکترومغناطیسی به کار می‌رفت. بعد از کشف الکترون، پرتوهای X و پرتوزایی طبیعی، این‌ها نیز زیر چتر اصطلاح تابش درآمدند. تابش‌های تازه کشف شده، بر عکس تابش الکترومغناطیسی که به صورت یک موج تلقی می‌شد، رفتار ذره گونه را از خود نشان می-دادند. در دهه 1920 دوبروی نظریه خود را مبنی بر دوگانگی ماده ارائه داد. که بعد از مدت کوتاهی با آزمایش پراش الکترون درستی آن به اثبات رسید و جدایی بین ذرات و امواج از بین رفت. امروزه مراد از تابش تمامی طیف الکترومغناطیسی و نیز تمام ذرات کشف شده اتمی و زیر اتمی است.

تابش‌ها را بر پایه‌ی یوننده بودن و یوننده نبودن گروه‌بندی می‌کنند. یوننده بودن به معنای توانایی تابش در یونیدن گازی است که از آن عبور می‌کند.

تابش نایوننده، تابش الکترومغناطیسی با طول موج حدود 10 nm یا بیشتر است که شامل امواج رادیویی، میکرو موج‌ها، نور مرئی و نور فرابنفش است. تابش‌های یونساز شامل بقیه‌ی طیف الکترومغناطیسی (پرتوهای X و پرتوهای گاما) و تمام ذرات اتمی و زیر اتمی مثل الکترون، پوزیترون، پروتون، آلفا، یون‌های سنگین و مزون‌ها را نیز در بر دارد.

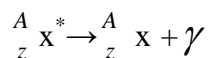
۱-۲ طیف آماری

گسیل تابش چیزی نیست جز رها شدن انرژی توسط یک سیستم هنگامی که از یک حالت به حالتی دیگر می‌رود.

گسیل تابش اتمی و هسته‌ای از نظریه‌ی کوانتمی پیروی می‌کند. در نتیجه فقط می‌توان از احتمال اینکه یک واکنش رخ دهد یا ذره‌ای گسیل شود صحبت کرد. اگر تعداد ذراتی که از یک واکنش گسیل می‌شوند، اندازه گرفته شوند، این عدد بر حسب زمان ثابت نیست بلکه دارای یک عدم قطعیت آماری است [۱].

۱-۳ برهم‌کنش پرتوی گاما با ماده

همان‌طور که اشاره شد پرتو گاما یک نوع تابش به شمار می‌رود. وقتی یک هسته از یک حالت برانگیخته به یک حالت با انرژی کمتر می‌رود تفاضل بین این دو حالت به صورت یک فوتون (پرتوهای گاما که به صورت ذره در نظر گرفته شده و فوتون نامیده می‌شوند) آزاد می‌شود. واپاشی گاما به صورت:



نمایش داده می‌شود. باید توجه داشت که منشاء پرتوهای X بر خلاف پرتوهای γ (منشاء گذار هسته‌ای) ناشی از گذارهای اتمی با انرژی کمتر است و هر دو تک انرژی می‌باشند.

در زیر فهرست فرایندهای ممکن که باعث برهم‌کنش پرتوی گاما با ماده می‌شود، آورده شده است.

اثر آنها

انواع برهم‌کنش‌های پرتوی گاما

- | | |
|------------------------|---|
| (a) جذب کامل | (۱) برهم‌کنش با الکترون اتمی |
| (b) پراکندگی همدوس | (۲) برهم‌کنش با نوکلئون‌ها |
| (c) پراکندگی غیر همدوس | (۳) برهم‌کنش با میدان الکتریکی احاطه کننده هسته یا الکترون‌ها |
| | (۴) برهم‌کنش با میدان مزونی اطراف نوکلئون‌ها |

ترکیب دو ستون بالا منجر به دوازده فرایند می‌شود و این یعنی در محدوده نظری دوازده پدیده متفاوت که طی آن جذب یا پراکندگی برای پرتو گاما اتفاق می‌افتد، وجود دارد. مثل پراکندگی ریلی، پراکندگی تامسون، پراکندگی دلبروک، پراکندگی رزونانس هسته‌ای، تولید مزون و . . . که بعضی از این فرایندها اصلاً مشاهده نشده و بعضی‌ها کاملاً کم یابند.

اما از میان این فرایندها سه فرایند با احتمال زیاد رخ می‌دهد عبارتند از،

۱- پراکندگی کامپتون

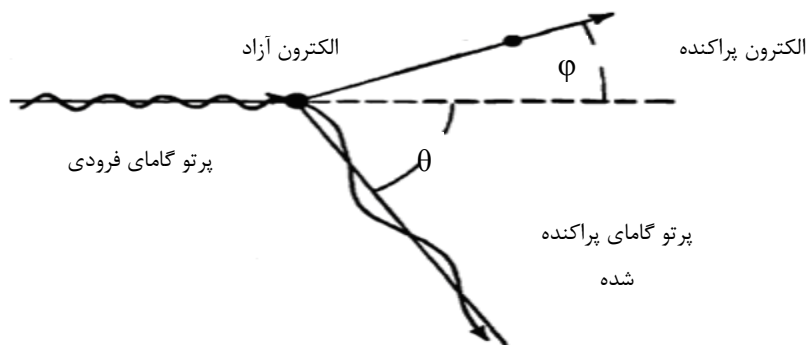
۲- فوتوالکتریک

۳- تولید زوج

در ادامه به بررسی این سه برهم‌کنش می‌پردازیم [۲].

۱-۳-۱ پراکندگی کامپتون

اثر کامپتون، برخورد بین یک فوتون و یک الکترون آزاد است (شکل ۱-۱). البته در شرایط متعارفی تمام الکترون‌های موجود در یک ماده مقیدند اما از انرژی بستگی الکترون که مرتبه آن eV است در مقابل انرژی فوتون از مرتبه keV صرف نظر شده و می‌توان الکترون را آزاد در نظر گرفت.



شکل ۱-۱ اثر کامپتون

در این پدیده، فوتون نابود نمی‌شود و فقط راستای آن تغییر کرده و انرژی فوتون کم می‌شود. اگر الکترون قبل از پراکندگی ساکن در نظر گرفته شود، از پایستگی انرژی داریم.

$$T = E_{\gamma} - E_{\gamma}' \quad (2-1)$$

که در آن E_{γ} و E_{γ}' به ترتیب انرژی پرتو فرودی و انرژی پرتو پراکنده شده و T انرژی الکترون پراکنده شده است. برای پیدا کردن رابطه E_{γ}' و T با E_{γ} باید از روابط پایستگی انرژی و تکانه استفاده کنیم. اگر جرم سکون الکترون E_0 و انرژی آن بعد از پراکندگی E باشد داریم:

بقا انرژی:

$$E_{\gamma} + E_0 = E_{\gamma}' + E \rightarrow E = E_0 + E_{\gamma}' + E_{\gamma} \quad (3-1)$$

بقا اندازه حرکت:

$$\vec{P}_{\gamma} + 0 = \vec{P}_{\gamma}' + \vec{P}_e \quad \begin{cases} P_{\gamma} + 0 = P_{\gamma}' \cos \theta + P_e \cos \varphi & \text{راستای انتشار} & (4-a-1) \\ 0 = P_{\gamma}' \sin \theta + P_e \sin \varphi & \text{عمود بر راستای انتشار} & (4-b-1) \end{cases}$$

که θ زاویه پراکندگی فوتون فرودی در راستای انتشار و φ زاویه پراکندگی فوتون فرودی در راستای فرود است. دو رابطه بالا را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$P_{\gamma} - P_{\gamma}' \cos \theta = P_e \cos \varphi \quad (5-a-1)$$

$$P_{\gamma}' \sin \theta = P_e \sin \varphi \quad (5-b-1)$$

اگر به توان دو رسیده و با هم جمع شوند، داریم:

$$P_{\gamma}^2 + P_{\gamma}'^2 - 2 P_{\gamma} P_{\gamma}' \cos \theta = P_e^2 \quad (6-1)$$

با ضرب طرفین رابطه بالا در c^2 و داشتن روابط زیر:

$$P_{\gamma}^2 c^2 = E_{\gamma}^2 \quad (7-1)$$

$$P_{\gamma}'^2 c^2 = E_{\gamma}'^2$$

رابطه (6-1) به صورت زیر ساده می‌شود.

$$E_{\gamma}^2 + E_{\gamma'}^2 - 2 E_{\gamma} E_{\gamma'} \cos \theta = P_e^2 c^2 \quad (8-1)$$

می‌دانیم که انرژی کل الکترون به صورت زیر است.

$$E = \sqrt{P_e^2 c^2 + E_0^2} \rightarrow E^2 - E_0^2 = P_e^2 c^2 \quad (9-1)$$

از ترکیب رابطه (9-1) و (8-1) داریم.

$$E_{\gamma}^2 + E_{\gamma'}^2 - 2 E_{\gamma} E_{\gamma'} \cos \theta + E_0^2 = E^2 \quad (10-1)$$

با به توان دو رساندن رابطه (10-1) و ترکیب آن با رابطه (9-1) داریم.

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + ((1 - \cos \theta) / m_0 c^2) E_{\gamma}} \quad (11-1)$$

و از رابطه (11-1) و (10-1) انرژی جنبشی الکترون به صورت زیر بدست می‌آید.

$$T = E_{\gamma} - E_{\gamma'} = \frac{((1 - \cos \theta) / m_0 c^2) E_{\gamma}}{1 + ((1 - \cos \theta) / m_0 c^2) E_{\gamma}} E_{\gamma} \quad (12-1)$$

با توجه به روابط (11-1) و (12-1) پرتو گاما زمانی بیشترین انرژی را دارد که $\theta = 0$ و به تبع آن انرژی

الکترون پراکنده شده کمینه است و داریم:

$$\begin{aligned} E_{\gamma' \max} &= E_{\gamma} \\ T_{\min} &= 0 \end{aligned} \quad (13-1)$$

انرژی کمینه فوتون فرودی زمانی بدست می‌آید که $\theta = \pi$ باشد.

$$E_{\gamma' \min} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (2 / m_0 c^2) E_{\gamma}} \quad (14-1)$$

$$T_{\max} = \frac{(2 / m_0 c^2) E_{\gamma}}{1 + (2 / m_0 c^2) E_{\gamma}} E_{\gamma} \quad (15-1)$$

با توجه به محاسبات بالا انرژی فوتون پراکنده شده هیچ گاه صفر نمی‌شود و این یعنی فوتون هرگز نابود نمی‌شود و غیر ممکن است که تمام انرژی فوتون فرودی به الکترون منتقل شود. انرژی الکترون در فاصله-ای برابر با برد الکترون در ماده از بین می‌رود و فوتون پراکنده شده ممکن است فرار کند.

۱-۳-۲ سطح مقطع پراکندگی کامپتون

احتمال این که پراکندگی کامپتون رخ دهد را اصطلاحاً سطح مقطع کامپتون گویند. که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\sigma (m^{-1}) = N Z f (E_{\gamma}) \quad (16-1)$$

$\sigma (cm^{-1})$ احتمال رخ داد کامپتون بر واحد مسیر پیموده شده، تعداد اتم‌ها در واحد حجم که برابر با حاصل ضرب تعداد مول‌های واحد حجم در N_A است.

$$N = N_A n / V \quad (17-1)$$

Z عدد اتمی و $f (E_{\gamma})$ تابعی بر حسب انرژی فوتون‌های فرودی است. اگر رابطه را بر حسب چگالی بنویسیم داریم.

$$\sigma (m^{-1}) = \rho \frac{N_A}{A} Z f (E_{\gamma}) \quad (18-1)$$

رابطه بالا با استفاده از رابطه زیر بدست آمده است.

$$N = N_A \frac{n}{V} = N_A \frac{m}{AV} = \rho \frac{N_A}{A} \quad (19-1)$$

می‌دانیم که برای اکثر اتم‌ها جز هیدروژن، $A = 2Z$ تا $A = 2.6Z$ است و بنابر معادله (۱۸-۱) احتمال رخداد پراکندگی کامپتون تقریباً مستقل از عدد اتمی ماده است.

اگر سطح مقطع کامپتون برای یک ماده مشخص باشد، با استفاده از معادله (۱۸-۱) می‌توان آن را برای هر ماده‌ی دیگر بدست آورد (برای فوتون‌های با انرژی یکسان).

$$\sigma_2 (m^{-1}) = \sigma_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{A_1}{A_2} \frac{Z_2}{Z_1} \quad (20-1)$$

معمولا سطح مقطع بر حسب m^2 / kg بیان می‌شود و روابط (۱۸-۱) و (۲۰-۱) به صورت زیر در می‌آیند.

$$\sigma (m^2 / kg) = \frac{N_A}{A} Z f (E_\gamma) \quad (21-1)$$

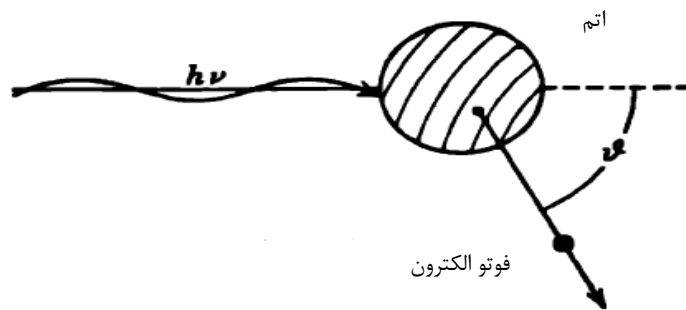
$$\sigma_2 (m^2 / kg) = \sigma_1 \frac{A_1}{A_2} \frac{Z_2}{Z_1} \quad (22-1)$$

۳-۳-۱ فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک برهم‌کنش بین یک فوتون و یک الکترون اتمی مقید است و در تمام مواد امکان رخ دادن این پدیده وجود دارد اما در فلزات با احتمال بیشتری صورت می‌گیرد. در این پدیده فوتون نابود شده و یکی از الکترون‌های اتمی به صورت یک الکترون آزاد به نام فتوالکتریک به بیرون انداخته می‌شود (شکل ۱-۲). انرژی جنبشی این الکترون برابر است با:

$$T = E_\gamma + B \quad (23-1)$$

E_γ انرژی فوتون‌های فرودی و B انرژی بستگی الکترون است. ممکن نیست که الکترون آزاد فرض شود چون در این صورت پایستگی تکانه و انرژی باهم امکان پذیر نیست.



شکل ۱-۲ فرایند فوتوالکتریک

بقا اندازه حرکت:

$$\vec{P}_\gamma + 0 = \vec{P}_{\gamma'} + \vec{P}_e \quad (24-1)$$

چون در این پدیده فوتون کاملا نابود می‌شود پس:

$$\vec{P}_{\gamma'} = 0 \quad (25-1)$$

در این صورت رابطه (۲۴-۱) به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\vec{P}_\gamma = \vec{P}_e \rightarrow \frac{h\nu}{c} = P_e \rightarrow P_e^2 c^2 = (h\nu)^2 \quad (26-1)$$

بقیاء انرژی

$$E_\gamma + E_0 = E \rightarrow h\nu + E_0 = E \quad (27-1)$$

از طرفی انرژی کل الکترون به صورت است.

$$E = \sqrt{P_e^2 c^2 + E_0^2} \rightarrow E^2 - E_0^2 = P_e^2 c^2 \quad (28-1)$$

طرفین رابطه (۲۷-۱) را به توان دو رسانده و با ترکیب با رابطه (۲۸-۱) به رابطه زیر می‌رسیم.

$$P_e^2 c^2 = (h\nu)^2 + 2h\nu E_0 \quad (29-1)$$

همانطور که پیش بینی شد روابط (۲۶-۱) و (۲۹-۱) به یک نتیجه منجر نشدند و پایستگی انرژی و تکانه

با هم برقرار نیست و برای برقراری این دو پایستگی با هم باید الکترون مقید فرض شود.

۳-۳-۱ سطح مقطع پدیده فوتوالکتریک

احتمال اینکه پدیده فوتوالکتریک رخ دهد را سطح مقطع فوتوالکتریک یا ضریب جذب فوتوالکتریک گویند

که با رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$\tau(m^{-1}) = \alpha N \frac{Z^m}{E_\gamma^n} [1 - \varepsilon(Z)] \quad (30-1)$$

$\tau(\text{cm}^{-1})$ احتمال رخ داد فوتوالکتریک بر واحد راه پیموده شده، α یک ضریب ثابت و مستقل از Z و E_γ

است، N تعداد اتم‌ها در واحد حجم، $\varepsilon(Z)$ نماینده جمله تصحیحی از مرتبه اول Z است.

اثر فوتوالکتریک برای موادی با Z بالا و در انرژی‌های پایین مهم است. با استفاده از معادله (۳۰-۱)، می-

توان ضریب فوتوالکتریک یک عنصر را بر حسب ضریب فوتوالکتریک، عنصر دیگر بدست آورد.

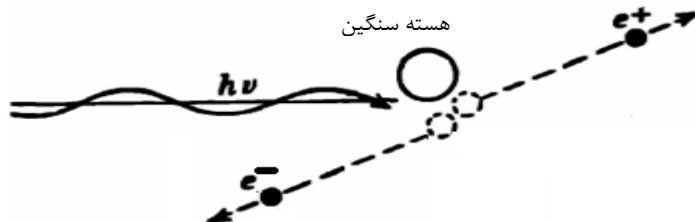
$$\tau_2 (m^{-1}) = \tau_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^n \quad (31-1)$$

که در آن ρ_i ، A_i و Z_i به ترتیب، چگالی، عدد جرمی و وزن اتمی دو عنصر هستند. حال اگر τ_1 و τ_2 بر حسب m^2 / kg بیان شوند داریم.

$$\tau_2 (m^2 / kg) = \tau_1 \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^n \quad (32-1)$$

۳-۱-۵ تولید زوج

تولید زوج، برهم کنش بین یک فوتون و یک هسته است. بر اثر این برهم کنش فوتون نابود می شود و یک زوج الکترون-پوزیترون آفریده می شود (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱ فرایند تولید زوج در مجاورت هسته

هسته دچار هیچ تغییری نمی شود اما وجود آن ضروری است. در زیر اثبات می شود که در فضای تهی، از نابودی یک پرتو گاما، زوج الکترون-پوزیترون تولید نمی شود چون انرژی و تکانه با هم پایسته نیستند.

پایستگی تکانه (فرض می شود که دو ذره تکانه یکسانی داشته باشند و در دو جهت مخالف هم حرکت کنند):

$$P_\gamma = 2P_e \quad (33-1)$$

از طرفی داریم.

$$E_\gamma = P_\gamma c \rightarrow h\nu = 2P_e c = 2\sqrt{E_e^2 - E_0^2}$$

$$\rightarrow E_\gamma = 2\sqrt{E_e^2 - E_0^2} \quad (34-1)$$

و از پایستگی انرژی داریم.

$$E_{\gamma} = h\nu = 2m_0c^2 + 2E_{ke} = 2E_e \quad (35-1)$$

همان طور که از روابط (34-1) و (35-1) بر می آید برقرای این دو رابطه با هم امکان پذیر نمی باشد. در نتیجه ی بقاء انرژی رابطه زیر برای انرژی جنبشی الکترون و پوزیترون برقرار است.

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_{\gamma} - (m_0c^2)_{e^-} - (m_0c^2)_{e^+} = E_{\gamma} - 1.022MeV \quad (36-1)$$

با توجه به معادله بالا حداقل انرژی که فوتون باید داشته باشد برابر با 1.022 MeV است تا پدیده تولید زوج رخ دهد. برای تمام منظوره های علمی، الکترون و پوزیترون انرژی جنبشی حاصل را بین خود به صورت مساوی تقسیم می کنند.

$$T_{e^-} = T_{e^+} = \frac{1}{2} (E_{\gamma} - 1.022 MeV) \quad (37-1)$$

در پدیده تولید زوج فوتون اولیه حذف می شود، اما در ادامه با نابودی پوزیترون دو فوتون با انرژی 0.511MeV آفریده می شود این دو فوتون معروف به گاماها ی نابودی هستند. حال اگر پدیده تولید زوج در مجاورت یک الکترون رخ دهد در این صورت حداقل انرژی که فوتون باید داشته باشد به صورت زیر بدست می آید.

پایستگی انرژی:

$$E_{\gamma} + m_0c^2 = 3\sqrt{P_e^2c^2 + m_0c^4} \quad (38-1)$$

پایستگی تکانه:

$$P_{\gamma} = 3P_e \rightarrow E_{\gamma} = 3P_e c \quad (39-1)$$

از جایگذاری رابطه (38-1) در رابطه (39-1) داریم.

$$h\nu + m_0c^2 = 3\sqrt{\left(\frac{E_{\gamma}}{3}\right)^2 + m_0^2c^4} \quad (40-1)$$

اگر طرفین رابطه را به توان دو برسانیم داریم.

$$(h\nu)^2 + m_0^2 c^4 + 2h\nu m_0 c^2 = 9 \left(\frac{E_\gamma}{3} \right)^2 + 9m_0^2 c^4 \quad (41-1)$$

و در نهایت داریم.

$$E_\gamma = 4m_0 c^2 \quad (42-1)$$

۱-۳-۶ سطح مقطع پدیده تولید زوج

احتمال اتفاق افتادن پدیده تولید زوج را سطح مقطع تولید زوج و یا ضریب تولید زوج گویند و به صورت زیر تعریف می شود.

$$\kappa (m^{-1}) = N Z^2 f(E_\gamma, Z) \quad (43-1)$$

$\kappa (cm^{-1})$ احتمال رخ داد تولید زوج در واحد راه پیموده شده، $f(E_\gamma, Z)$ تابعی است که اندکی با Z تغییر می کند و با E_γ افزایش می یابد. این احتمال بر خلاف دو احتمال قبلی با انرژی افزایش می یابد.

اگر سطح مقطع تولید زوج برای یک عنصر معلوم باشد، از روی آن می توان این سطح مقطع را برای عناصر دیگر بدست آورد.

$$\kappa_2 (m^{-1}) = \kappa_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \quad (44-1)$$

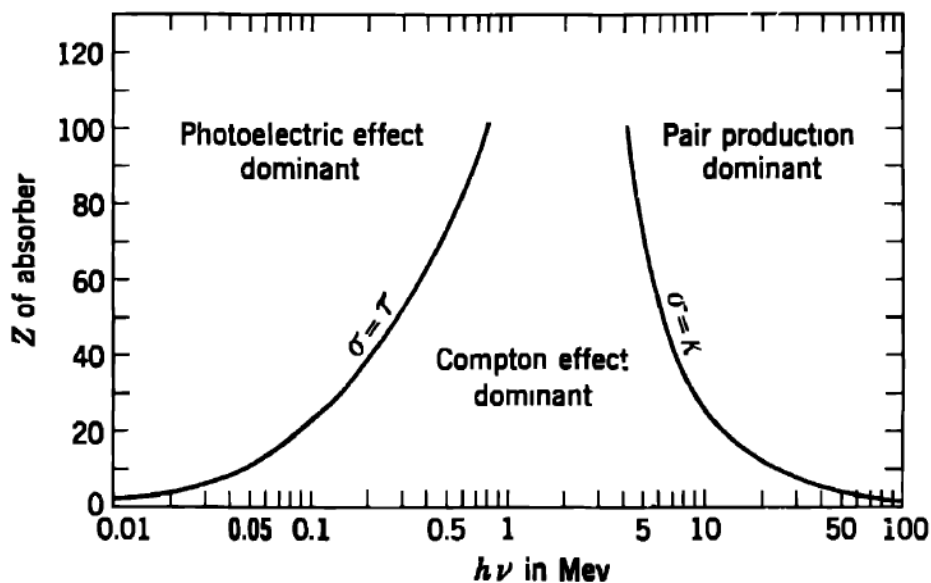
حال اگر κ بر حسب m^2 / kg بیان شود رابطه بالا به صورت زیر در می آید.

$$\kappa_2 (m^2 / kg) = \kappa_1 \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \quad (45-1)$$

۱-۴ ضریب تضعیف کل

وقتی یک فوتون در درون ماده حرکت می کند، ممکن است از طریق هر یک از سه برهم کنش عمده ای که پیش از این مورد بحث قرار گرفت، اندرکنش نماید (برهم کنش های دیگری نیز همان طور که اشاره شد وجود دارند، اما در آشکارسازی پرتو گاما اهمیت ندارند).

شکل ۶-۱ اهمیت نسبی سه برهم‌کنش یاد شده را وقتی E_γ و Z تغییر می‌کنند نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱ اهمیت نسبی سه برهم‌کنش پرتو گاما با ماده [۲]

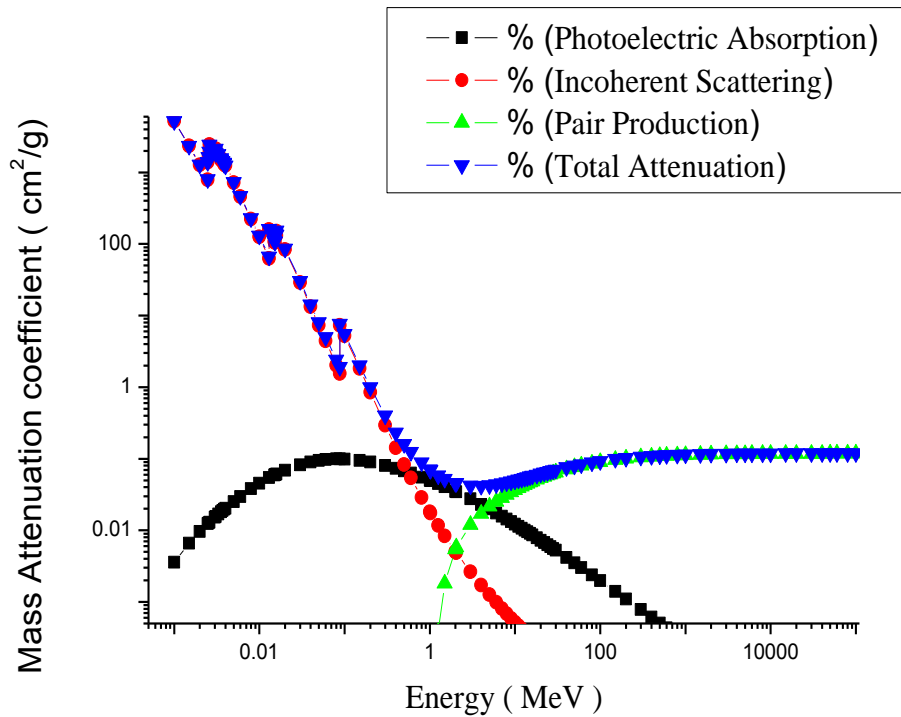
احتمال کل برهم‌کنش پرتو گاما با ماده که به اصطلاح ضریب تضعیف خطی کل نامیده می‌شود برابر با حاصل جمع سه احتمال است.

$$\mu (m^{-1}) = \tau + \sigma + \kappa \quad (۴۶-۱)$$

از نظر فیزیکی، μ احتمال برهم‌کنش بر واحد فاصله است. در بسیاری از جدول‌ها μ بر حسب m^2 / kg (یا cm^2 / g) داده می‌شود، و آن را ضریب تضعیف جرمی کل می‌نامند. رابطه‌ی بین ضریب‌های خطی و جرمی به صورت زیر است.

$$\mu (m^2 / kg) = \frac{\mu (m^{-1})}{\rho (kg / m^3)} \quad (۴۷-۱)$$

شکل ۵-۱ تک تک ضریب‌ها و ضریب تضعیف جرمی کل را برای سرب به صورت تابعی از انرژی نشان می‌دهد. ضریب تضعیف جرمی کل دارای یک کمینه است زیرا با افزایش انرژی، κ افزایش یافته، σ نسبت به تغییرات انرژی ثابت است و τ کاهش می‌یابد. این کمینه برای عناصر مختلف، متفاوت است.



شکل ۱-۵ ضرایب تضعیف جرمی برای سرب ($Z = 82$ و $\rho = 11.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) [۳].

اگر یک باریکه موازی و تک انرژی از پرتوهای گاما از ماده‌ای به ضخامت x عبور کنند احتمال این که یک فوتون بدون برهم‌کنش از این ضخامت عبور کند برابر با $e^{-\mu x}$ است. فاصله بین دو برهم‌کنش متوالی موسوم به مسافت آزاد میانگین است که به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\lambda(m) = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (48-1)$$

به سادگی نشان داده شد که مسافت آزاد میانگین عکس ضریب تضعیف خطی کل است. ضریب تضعیف جرمی کل برای یک ترکیب یا مخلوط به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\mu_c (\text{m}^2 / \text{kg}) = \sum_i w_i \mu_i (\text{m}^2 / \text{kg}) \quad (49-1)$$

که μ_c ضریب تضعیف جرمی کل برای یک ترکیب یا مخلوط، w_i کسر وزنی عنصر A_i و μ_i ضریب تضعیف جرمی کل عنصر A_i است [۱].

در این پژوهش توجه خود را به نتیجه نهایی برهم‌کنش پرتوهای گاما با ماده که جذب و پراکندگی آن‌ها است معطوف کرده و از روی میزان جذب و پراکندگی پرتوهای گاما توسط خاک، رطوبت آن را اندازه می‌گیریم (چگالی خاک رابطه مستقیم با رطوبت آن دارد).



فصل دوم

شبیه‌سازی مونت کارلو و کد MCNP-4C

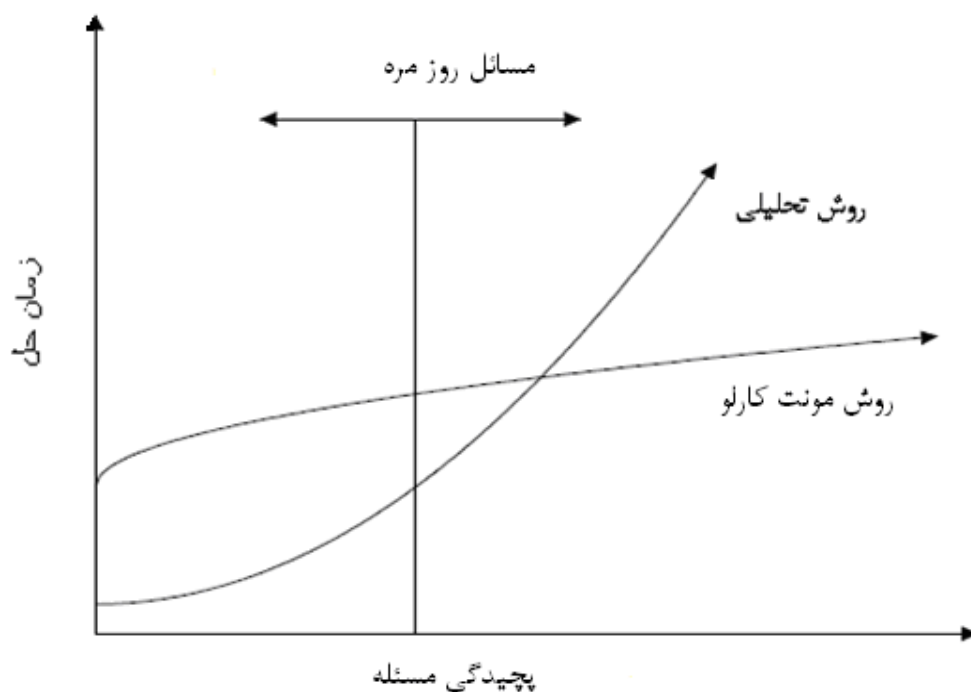
مقدمه

روش های مورد استفاده در محاسبات ترابرد ذرات هسته‌ای به دو صورت

الف) قطعی یا تحلیلی

ب) آماری یا مونت کارلو

می‌باشد که روش حل، به پیچیدگی و ماهیت مسئله بستگی دارد. روش مونت کارلو در رقابت با روش قطعی است. شکل ۱-۲ مقایسه دو روش مونت کارلو و تحلیلی را برای مسائل روزمره نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ رابطه زمان حل مسئله با پیچیدگی آن

روش اول شامل حل معادله ترابرد هر ذره و گسسته سازی پارامترهای وابسته به جهت، مکان، انرژی و محاسبه مقادیر آنها در تقسیم‌بندی‌های مشخص زاویه‌ای، مکانی و انرژی می‌باشد البته باید توجه داشت که دقت مکانی این کدها محدود به تعداد تقسیمات مکانی قابل استفاده در آنها است و همگرایی معادلات دیفرانسیل تنها مربوط به راه حل ریاضی مسئله می‌باشد. روش دوم یکی از تکنیک‌های بسیار کارآمد و

مفید برای شبیه‌سازی فرایندهای آماری و شبه آماری است. اساس این روش مبتنی بر اعداد تصادفی است در این روش تک تک ذرات و ترابرد آنها شبیه‌سازی می‌شود و رفتار میانگین ذرات ترابرد شده استنباط می‌شود [۴].

۱-۲ فرایندهای آماری و شبیه‌سازی مونت کارلو

هر فرایندی که ماهیت تصادفی داشته باشد، یک فرایند آماری است. بسیاری از فرایندها در طبیعت نظیر انداختن سکه، ریختن تاس، حرکت اتم‌ها در گاز، پراکندگی تابش‌ها، تونل زنی کوانتمی، واپاشی مواد رادیواکتیو و برهم‌کنش تابش‌ها با ماده ماهیت آماری دارند.

شبیه‌سازی عددی هر فرایند آماری یا شبه آماری به کمک اعداد تصادفی امکان پذیر است، که به آن روش مونت کارلو می‌گویند. ساز و کار روش مونت کارلو به یکی از دو روش زیر است.

۱- در صورت امکان خود مسئله شبیه سازی می‌شود.

۲- ابتدا یک مدل مناسب که با مسأله مورد نظر توافق داشته باشد ساخته شده، سپس آن مدل شبیه‌سازی می‌شود.

در هر حالت، پارامترهای تصادفی مورد نیاز بر اساس توزیع‌های آماری موجود در مسأله چندین بار نمونه‌گیری و سرانجام نتایج به دست آمده تحلیل آماری می‌شوند. از آنجا که در شبیه‌سازی مونت کارلو فرایند مورد نظر همانند آن چه در واقعیت اتفاق می‌افتد شبیه‌سازی می‌شود، می‌توان آن را یک آزمایش نظری دانست [۴]. البته شاید بزرگترین سود استفاده از روش مونت کارلو در شبیه‌سازی ترابرد تابش، توانایی دسترسی به هندسه‌های پیشرفته باشد [۵].

۲-۲ تاریخچه روش مونت کارلو

اولین استفاده از روش مونت کارلو به کار دانشمندان روی سلاح‌های هسته‌ای در لوس آلاموس در سال 1940 نسبت داده می‌شود ولی اولین گام در کاربست نمونه‌گیری تصادفی، منتسب به کنت بوفن است که

برای حل یک انتگرال آن را به کار برد. در سال 1777 م. او آزمایشی را انجام داد که به انداختن یک سوزن به طول d روی صفحه‌ای که در آن خطوط موازی به فاصله L ($D < L$) رسم شده بود، احتمال قطع شدن یکی از خطوط با سوزن را بدست آورد (P)، کنت بوفن با انجام مکرر این آزمایش و همچنین با آنالیز ریاضی نشان داد که مقدار احتمال عبارت است از:

$$P = 2 \frac{L}{\pi d} \quad (1-2)$$

چند سال بعد، لاپلاس در سال 1786 پیشنهاد کرد که با روش فوق می‌توان، با پرتاب سوزن عدد π را بدست آورد. لرد کلوین تلاش کرد تا از نمونه‌گیری تصادفی در محاسبه انتگرال‌های انرژی جنبشی (که در نظریه جنبشی گازها ظاهر می‌شود) استفاده نماید.

امیلیوسجر، همکار و شاگرد فرمی، شکلی از مونت کارلو را برای ترابرد نوترون ایجاد کرد. در طول جنگ جهانی دوم در لوس آلاموس، فرمی دانشمندان سرشناس را برای ایجاد اولین بمب اتمی دور هم جمع کرد (پروژه منهتن) [۴].

مونت کارلو زمانی مورد توجه و مطالعه دانشمندان قرار گرفت که رایانه‌های الکترونیکی تحت عنوان اینیاک برای اولین بار پا به عرصه گذاشتند (1945).

استن آلام فهمید که تکنیک نمونه‌گیری تصادفی به علت طولانی و ملالت بار بودن غیر عملی است اما با توسعه رایانه‌ها می‌تواند عملی شود. آلام ایده‌اش را با نیومن و مترو پلیس در میان گذاشت. در این فاصله یک گروه از دانشمندان جنگ به سرپرستی جان ماچلی برای توسعه اولین رایانه‌های الکترونیکی در دانشگاه پنسیلوانیا در شهر فیلادلفیا شروع به کار کردند.

در 1945 نیومن، آلام، مترو پلیس همراه با تلو از دانشکده مهندسی الکترونیک در دانشگاه پنسیلوانیا دیدن کردن تا استفاده از اینیاک را برای محاسبات مربوط به اسلحه‌های ترموکوپلی هسته‌ای، بررسی کنند. چند ماه بعد کار جدی برای انجام محاسبات مربوط به این اسلحه آغاز شد.

در 11 مارس 1947 نیومن نامه‌ای به رابرت ریچتمیر (مدیر بخش نظری در لوس آلاموس) فرستاد و در آن استفاده از مدل آماری را برای حل مسائل انتشار و تکثیر نوترون در ابزار شکافت، پیشنهاد داد.

نامه‌ی وی اولین فرمول‌بندی از محاسبه مونت‌کارلو برای یک ماشین محاسبه الکترونیکی بود. در سال 1947 در لوس آلاموس فرمی یک ابزار مکانیکی موسوم به فرمیکا (FERMIAC) را ساخت. این وسیله مسیر نوترون را در داخل مواد شکافت‌پذیر ردیابی می‌کرد.

استن آلام در سال 1948 برای کمیسیون انرژی اتمی توضیح داد که روش مونت‌کارلو نه تنها در مسائل مربوط به هسته بلکه می‌تواند در مطالعه شکافت هم موفق باشد و همچنین برای تابش‌های کیهانی و مطالعه معادلات دیفرانسیل جزئی نیز به کار برده شود. در اواخر دهه 1940 و اوایل 1950 موجی از مقالات که روش مونت کارلو و چگونگی حل مسائل تابش، ترابرد ذرات و . . . منتشر شد و بسیاری از روش‌هایی که در این مقالات توصیف شد هنوز در شبیه‌سازی‌های مونت کارلو استفاده می‌شود.

همراه با پیشرفت رایانه‌ها، روش مونت کارلو نیز توسعه یافت به طوری که برای هر مسئله یک کد به زبان ماشین نوشته شد. در سال 1960 با استفاده از رایانه‌های پیشرفته و زبان برنامه‌نویسی فرترن 77 امکانات کلی‌تری در کدها ایجاد شد [۵].

۲-۳ ساختار MCNP

MCNP کدی چند منظوره است که برای ترابرد الکترون، فوتون و نوترون استفاده می‌شود. در این کد تمام برهم‌کنش‌های پرتو گاما شامل پراکندگی‌های هم‌دوس و غیر هم‌دوس و فرایندهای جذب، از لحظه گسیل پرتو توسط چشمه تا لحظه نابودی (که یا در ماده جذب یا از محیط مورد مطالعه خارج شده)

شبیه‌سازی می‌شود. بازه انرژی شبیه‌سازی برای نوترون برابر با $20 \text{ MeV} - 10^{-11}$ ، برای الکترون و فوتون 1 keV تا 1 GeV می‌باشد همچنین این کد توانایی محاسبه k_{eff} را برای سیستم‌های شکافت‌پذیر دارد. استفاده کننده این کد باید یک فایل ورودی بنویسد که اطلاعاتی مثل هندسه مسئله، شرح مواد برای انتخاب مقادیر سطح مقطع، موقعیت و ویژگی چشمه نوترون، فوتون و الکترون، نوع پاسخ یا شرح خروجی و استفاده از تکنیک کاهش واریانس برای بهبود کارایی، را شامل می‌شود. به خاطر داشتن پنج قانون وقتی محاسبات مونت کارلو اجرا می‌شود ضروری است این قوانین به صورت زیر است.

۱- تعریف یک هندسه و چشمه خوب

۲- اطلاعات از دست رفته غیر قابل بازیابی

۳- نتایج قابل اطمینان

۴- کاهش واریانس برای احتیاط

۵- تعداد تاریخچه‌های اجرا شده نشان دهنده کیفیت پاسخ نیست

ورودی MCNP شامل سه قسمت اصلی است. ابتدا سطوحی که هندسه مسئله را تشکیل می‌دهد را معرفی کرده و بعد سلول‌ها را تعریف می‌کنیم. سلول‌ها حجم‌هایی هستند که توسط سطوح احاطه شده‌اند و در نهایت قسمت سوم که شامل معرفی مواد، چشمه، نوع ذره ترابرد شده، نوع خروجی و ... است [۵].

۲-۴ تاریخچه MCNP

اولین کد برای ترابرد ذرات در لوس‌آلوس، MCS بود که در سال 1963 نوشته شد این کد برای حل مسائل محدودی بدون نیاز به حل تحلیلی اجرا شد. با پیشرفت و توسعه کد MCS کد MCN در سال 1965 ایجاد شد این کد حل مسائل برهمکنش نوترون با ماده را در هندسه سه بعدی با استفاده از داده‌های ذخیره شده در کتابخانه‌های پیشرفته در برداشت. در سال 1973 کد MCN با کد MCG (کد مونت-

کارلو برای پرتوهای گامای انرژی بالا)، ادغام شد و کد MCNG پدید آمد که نخستین کد ترابرد فوتون-گاما با هم بود. در سال 1977 با ترکیب کد MCNG با کد MCP (کد مونت کارلو با جزئیات رفتار فیزیکی ذرات در زیر 1 keV) ادغام شد و کد MCNP ایجاد شد، که ویژگی‌های زیادی مثل وجود تالی‌های (خروجی) تعمیم یافته، محاسبه حجم، محاسبه k_{eff} برای هسته‌های بحرانی توسط KCODE را در بر دارد.

در سال 1983 کد MCNP3 منتشر شد این کد توسط استانداردهای فرترن 77 موسسه استاندارد ملی آمریکا (ANSI) بازنویسی شد. MCNP3 اولین نسخه بین‌المللی MCNP بود که از طریق RSID منتشر شد.

نسخه دیگر MCNP3 ، MCNP3A در سال 1986 منتشر شد و نسخه بعدی MCNP3B در سال 1988 منتشر شد که شامل رسم خروجی (MCPLLOT)، وجود چشمه تعمیم یافته، چشمه سطحی، هندسه تکراری و شبکه‌ای و ترابرد چند منظوره و پیوسته و غیره را در بر داشت.

MCNP4 در سال 1990 منتشر شد که اولین نسخه کد UNIX (نسخه N-ذره‌ای با محاسبات موازی را در بر داشت) این کد ترابرد الکترون‌ها را با اضافه کردن کد TS، تالی ارتفاع پالس، تقریب برمشترالونگ برای هدف‌های ضخیم در ترابرد فوتون، کره‌های DXTRAN، مولد اعداد تصادفی بهتر و رسم خروجی بعد از اجرای کد و ... را در برداشت.

MCNP4B در سال 1997 منتشر شد که ارتفاع ترابرد فوتون مطابق ITS3.0، محاسبات موازی، رسم سطح مقطع، ارتفاع سیستم رایانه‌ای 64 bit ، افزایش طول عمر نوترون، قابلیت شبکه‌بندی سطوح منطقی و غیره را در برداشت.

MCNP-4C در سال 2000 منتشر شد که بهبود بخش تشدید تفکیک‌پذیر، کلان سطح‌ها، اهمیت مش، ارتقاء محاسبات اختلالی، ارتقاء ترابرد الکترون، ارتقاء رسم‌کننده‌ها، خروجی تجمعی، ارتقاء محاسبات موازی و ... را در برداشت [۵].

۲-۵ خطای آماری اندازه‌گیری تابش‌ها

وایشی پرتوزا یک فرایند کاتوره‌ای است که از توزیع پواسون پیروی می‌کند، بنابراین انحراف معیار میانگین n برابر با \sqrt{n} و خطای نسبی آن برابر با:

$$\frac{\sigma_n}{n} = \frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (۲-۲)$$

این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش شمارش خطای نسبی کاهش می‌یابد.

اگر یک رشته، متشکل از N اندازه‌گیری را با نتیجه‌های $n_i | i=1, 2, \dots, N$ با شرایطی یکسان و در مدت زمان شمارش ثابت در نظر بگیریم میانگین این رشته اندازه‌گیری به صورت [۱]:

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (۳-۲)$$

اگر N به سمت بی‌نهایت میل کند در این صورت \bar{n} به سمت $\langle n \rangle$ میل خواهد کرد و $\langle n \rangle$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\langle n \rangle = \int_0^{\infty} n P(n) dn \quad (۴-۲)$$

انحراف معیار برابر با

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_i^N (n_i - \bar{n})^2 \approx (\overline{n^2}) - \bar{n}^2 \quad (۵-۲)$$

که

$$\overline{n^2} = \frac{1}{N} \sum_i^N n_i^2 \quad (۶-۲)$$

و واریانس برابر با

$$\overline{S_x^2} = \frac{1}{N} S^2 \quad (7-2)$$

خطای نسبی در کد MCNP برابر با

$$R \equiv S_x / \bar{x} \quad (8-2)$$

و Rهای کمتر از 0.1 برای نتایج با معنی است. می توان R را به صورت:

$$R \equiv 1 / \sqrt{n} \quad (9-2)$$

نوشت [۵].



فصل سوم

اندازه‌گیری رطوبت

مقدمه

خاک از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده است. بسیاری از خصوصیات خاک به مقدار آب موجود در آن بستگی دارد که به آن رطوبت گفته می‌شود. فعالیت موجودات زنده و واکنش‌های شیمیایی خاک تابعی از مقدار رطوبت است. رطوبت را به دو صورت جرمی و حجمی تعریف می‌کنند. دانستن رطوبت خاک به دو دلیل دارای اهمیت است.

۱- معلوم بودن مقدار رطوبت خاک جهت محاسبه مقدار آب مورد نیاز به صورت آبیاری و بارندگی و نیز عمقی که مقدار معینی آب می‌تواند نفوذ کند، ضرورت دارد.

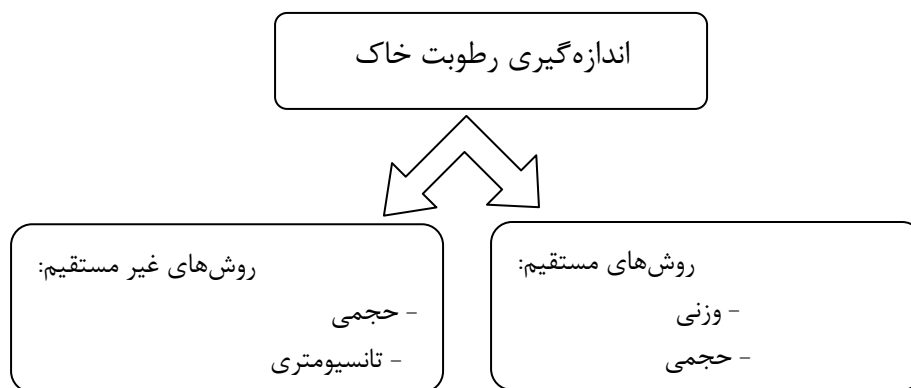
۲- با اندازه‌گیری‌های متوالی و مستمر مقدار رطوبت، می‌توان مقدار تبخیر و تعریق که از مهمترین بخش‌های اتلاف آب در چرخه هیدرولوژی به شمار می‌رود، را بدست آورد [۶].

البته باید توجه داشت که در مبحث مدیریت آبیاری، اندازه‌گیری و کنترل رطوبت خاک از مولفه‌های ضروری برای اعمال روش‌های مدیریتی بهینه به منظور کاهش مصرف آب و بهبود کیفیت محصول است. ابتدا به معرفی چند روش از روش‌های اندازه‌گیری رطوبت می‌پردازیم.

۱-۳ روش‌های اندازه‌گیری رطوبت

رطوبت خاک به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. برخی از روش‌ها در محل آزمایش انجام می‌شوند، اما در بعضی دیگر باید از خاک، نمونه برداری کرده و رطوبت را در آزمایشگاه اندازه‌گیری نمود. در روش‌های مستقیم مقادیر جرمی یا حجمی رطوبت بطور مشخص اندازه‌گیری می‌شوند. اما در روش‌های غیرمستقیم ابتدا باید یک عامل دیگر مانند: زمان، مقاومت، فرکانس و غیره که درصد رطوبت بر آن مؤثر است اندازه‌گیری شده و سپس از روی آن مقدار رطوبت خاک تخمین زده می‌شود. اکثر دستگاه‌های ساخته شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، غیرمستقیم هستند.

رطوبت موجود در خاک را می‌توان بطور مستقیم از طریق اندازه‌گیری اختلاف وزنی، قبل و بعد از خشک کردن نمونه خاک، بدست آورد که به آن روش وزنی می‌گویند. در این روش، رطوبت وزنی خاک را بر حسب وزن آب بر وزن خاک خشک بیان می‌کند. رطوبت حجمی بیانگر حجم آب موجود در حجم نمونه خاک دست نخورده است. با اینکه روش‌های مستقیم از دقت بالایی برخوردار بوده ($\pm 1\%$) و با هزینه کم قابل اندازه‌گیری است، خسته کننده، وقت گیر و کاربر هستند. حداقل زمان مورد نیاز برای انجام این روش - 2 روز است و بعلاوه بهم خوردن خاک قابلیت تکرار در محل اولیه را ندارند. روش‌های غیرمستقیم بسیاری برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد. در این روش‌ها رطوبت را توسط روابط واسنجی موجود با سایر متغیرهای قابل اندازه‌گیری برآورد می‌کنند. انتخاب هر یک از روش‌های غیرمستقیم بستگی به هزینه، دقت، زمان پاسخ، نصب، کاربرد مد نظر، مدیریت و دوام آن دارد. بسته به کمیت اندازه‌گیری، روش‌های غیرمستقیم به دو دسته حجمی و تانسیمتری طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۱-۳). دسته اول رطوبت حجمی خاک و دسته دوم مکش خاک یا پتانسیل آب-خاک را نشان می‌دهد. هر دو دسته وابسته به منحنی خصوصیات رطوبتی خاک می‌باشد. منحنی خصوصیات رطوبتی، رابطه‌ای است بین پتانسیل آب-خاک و درصد رطوبت آن، اگر در یک دستگاه محورهای مختصات مقادیر رطوبت و پتانسیل را نسبت به یکدیگر رسم کنیم منحنی خصوصیات رطوبتی حاصل می‌شود



شکل ۱-۳ روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک

لازم به ذکر است که هر خاک بسته به بافت، ساختمان و میزان مواد آلی موجود در آن دارای منحنی خصوصیات رطوبتی متفاوتی است [۷]. با توجه به خصوصیات فیزیکی خاک و هدف از اندازه‌گیری رطوبت، دستگاه‌های اندازه‌گیری انتخاب می‌شوند. رطوبت حجمی خاک کمیت کاربردی‌تری است. در خاک‌های با بافت ریز، آب با نیروی زیادی توسط ذرات خاک نگه‌داشته می‌شود، بنابراین حتی اگر رطوبت حجمی خاک نیز نسبتاً زیاد باشد، آب مورد نیاز گیاهان تامین نخواهد شد. در مطالعه روابط گیاه-خاک، اندازه‌گیری مکش خاک با توجه قدرت مکش گیاه در جذب آب از خاک می‌تواند کمیت مناسب‌تری باشد خصوصیات فیزیکی خاک (بافت، تورم، ترک) می‌تواند بر روی عملکرد روش انتخاب شده برای اندازه‌گیری رطوبت تاثیر گذار باشد زیرا برخی از حسگرها نیازمند تماس کامل با ذرات خاک می‌باشند. علاوه بر آن تابع نوع خاک، بارش، تبخیر و تعرق نیز است زیرا بعضی ابزار اندازه‌گیری نیازمند حفاظت و نگهداری خاصی می‌باشند. مدیریت آب، بر اساس اندازه‌گیری رطوبت موجود در خاک روش متداولی در تولیدات کشاورزی است. آگاهی از رطوبت خاک در هر مرحله به مدیر مزرعه این امکان را می‌دهد تا رطوبت موجود در خاک را در حد مورد نظر نگه دارد. این کار باعث کاهش هرز آب و آب‌شویی املاح شده، اما نیازمند انتخاب روش مناسبی برای آبیاری است [۸]. برای محاسبه حجم آبیاری، اعداد بدست آمده از روش تانسیمتری باید از طریق منحنی مشخصه خاک به رطوبت حجمی و یا وزنی تبدیل شوند. در ادامه به تشریح چند روش اندازه‌گیری رطوبت می‌پردازیم.

۳-۱-۱ تانسیمتر

اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک خاک با وسیله‌ی ساده‌ای به نام تانسیمتر انجام می‌شود. همه انواع تانسیمترها شامل جسم متخلخلی هستند که در تماس با خاک قرار می‌گیرد بطوریکه آب به راحتی می‌تواند از آن عبور کند. با توجه به میزان رطوبت خاک ممکن است آب از جسم متخلخل خارج و یا از محیط خاک وارد جسم متخلخل شود. تانسیمترها نیازمند واسنجی نیستند ولی بعد از نصب تانسیمتر در

محل مورد نظر باید مدت زمانی اجازه داد تا بین تانسئومتر و خاک تعادل برقرار گردد. در شکل ۲-۳ ساختمان یک تانسئومتر نمایش داده شده است.



شکل ۲-۳ ساختمان تانسئومتر

مزایت این روش امکان انجام چندین قرائت متوالی، عدم نیاز به جریان الکتریکی، ابزار بسیار مناسب برای برنامه‌ریزی آبیاری، عدم نیاز به آموزش ویژه توسط کاربر، غیرحساس به شوری، می‌باشد. معایب آن نیز به شرح زیر است: دامنه اندازه‌گیری محدود، نیاز به زمان برای اندازه‌گیری، تماس کامل سرامیک و خاک برای قرائت دقیق، نیاز به نگهداری ویژه و تامین آب لوله تانسئومتر لازم است.

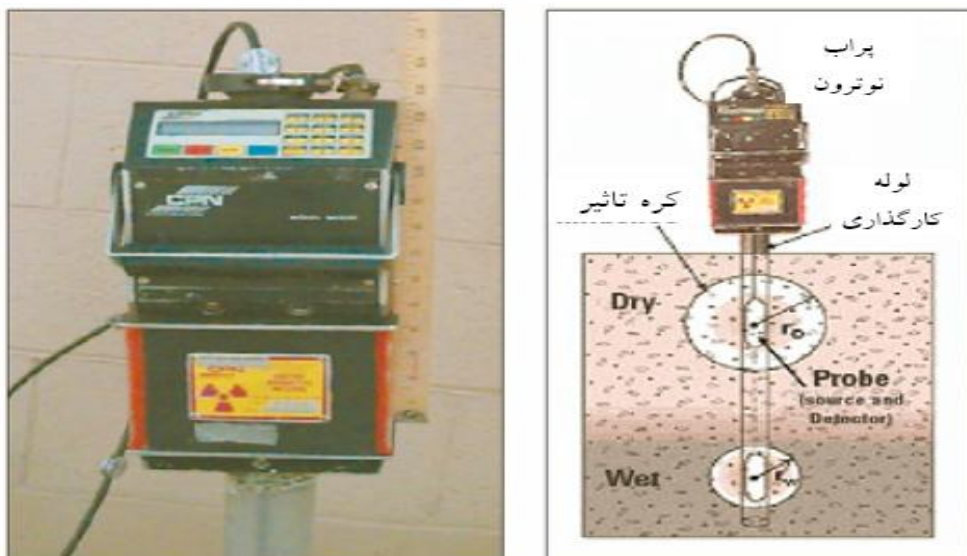
۲-۱-۳ روش حجمی

۱-۲-۱-۳ نوترون متر

نوترون‌های سریع از چشمه رادیواکتیو ($^{241}\text{Am-Be}$) به داخل خاک ساطع می‌شود. وقتی آنها با ذراتی با جرم مساوی خودشان تصادم می‌کنند (H) سرعتشان به شدت کاهش می‌یابد و توده‌ای از نوترون‌های کند شده را تشکیل می‌دهند. تا زمانی که آب به عنوان منبع اصلی هیدروژن در خاک باشد، تراکم نوترون‌های کند شده در اطراف میله تا اندازه زیادی بستگی به میزان آب موجود در خاک خواهد داشت.

پیکره‌بندی سنجه^۱ به شکل یک سیلندر باریک و طولانی است که شامل منبع نوترون و حسگر می‌باشد. اندازه‌گیری توسط جاگذاری سنجه در داخل لوله‌ای که قبلاً در خاک جاگذاری شده صورت می‌گیرد و رطوبت خاک را می‌توان در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری کرد. رطوبت خاک توسط نمودار واسنجی حاصله از تعداد نوترون‌های کند شده و نمونه‌های برداشت شده از منطقه کره تاثیر سنجه بدست می‌آید. شکل ۳-۳-۱

۳ نمای از نوترون متر را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳-۱ ساختمان نوترون متر

مزیت این روش نسبت به روش‌های مستقیم آن است که اولاً به سرعت انجام شده و نیازی به صرف وقت 1 تا 2 روزه ندارد و ثانیاً اندازه‌گیری بطور مستقیم در صحرا و در شرایط طبیعی صورت می‌گیرد، علاوه بر آن می‌توان یک آزمایش را چندین بار تکرار نمود تا از نتایج، اطمینان حاصل شود. معایب این روش عبارتند از: گران بودن دستگاه، نیاز به نیروی متخصص برای کار با دستگاه، خطرات ناشی از تابش نوترون و عدم امکان اندازه‌گیری رطوبت در لایه سطحی خاک، در خاک‌های محتوی مواد آلی نیازمند توجه و دقت زیاد در واسنجی می‌باشد، چون این خاک‌ها حاوی مقادیر زیادی اتم هیدروژن هستند.

¹prob

۲-۱-۲-۲ انعکاس سنجی حوزه زمانی (TDR)

یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری حجمی رطوبت، روش دی الکتریکی است. در این روش رطوبت موجود در خاک، با اندازه‌گیری ثابت دی الکتریک خاک K_a (که سرعت حرکت امواج یا تپ‌های الکترومغناطیسی در خاک است) صورت می‌گیرد. در خاک‌های مرکب مانند خاک متشکل از مواد معدنی، آب و هوا، ثابت دی الکتریک با در نظر گرفتن سهم هر کدام از اجزای تشکیل دهنده حاصل می‌شود بطوریکه ثابت دی الکتریک آب بسیار بزرگ‌تر از ثابت سایر اجزای تشکیل دهنده می‌باشد (k برابر با 2 تا 5 برای مواد تشکیل دهنده خاک و 1 برای هوا در حالت کلی ثابت دی الکتریک خاک بیشتر تحت تاثیر میزان آب موجود در خاک است).

در این روش ثابت دی الکتریک خاک توسط اندازه‌گیری زمان لازم برای عبور موج الکترومغناطیسی در طول خط انتقال که توسط ذرات خاک احاطه شده بدست می‌آید. دستگاه TDR مطابق شکل ۱-۴ نیازمند ابزاری برای تولید امواج الکتریکی در بازه زمانی ثابت و در محدوده فرکانسی 0.02 - 3 GHz برای عبور در طول کابل کواکسیال و سنجه می‌باشد. این امواج، بدون ارتباط با مشخصات فیزیکی خاک نظیر ساختمان، بافت و دما، پاسخی را تولید می‌کنند. سنجه TDR معمولاً شامل 2 یا 3 میله موازی فلزی است که به داخل خاک فرو برده می‌شود و همانند آنتن تلویزیون برای دریافت امواج و هدایت آن‌ها بکار می‌رود. از سوی دیگر TDR ابزار دیگری را برای اندازه‌گیری ولتاژ خطوط انتقال در فواصل 100 پیکو ثانیه بکار می‌گیرد. زمانی که موج الکترومغناطیسی در طول خطوط انتقال منتقل می‌شود، یک ناپیوستگی پیدا می‌کند، قسمتی از پالس که بازتابیده شده، در سطح ولتاژ خط انتقال تغییر ایجاد می‌کند. زمان انتقال t توسط آنالیز عددی ولتاژ تعیین می‌شود.



شکل ۳-۴ ساختمان TDR

از مزایای این روش می‌توان به خطای پایین این سیستم در اندازه‌گیری رطوبت به جز خاک‌های شور، همچنین این روش نیاز به واسنجی ویژه در خاک‌های مختلف ندارد و در نهایت قابلیت اندازه‌گیری در اعماق مختلف، حداقل تخریب خاک، حساسیت کم نسبت به خاک‌های باشوری نرمال، قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان رطوبت و هدایت الکتریکی خاک اشاره کرد. معایب این روش، گران بها بودن سیستم به علت پیچیدگی آن، اختلال در اندازه‌گیری در خاک‌های خیلی شور و خاک‌های رسی با هدایت الکتریکی بالا، نیاز به مدرج‌سازی ویژه برای خاک‌های شامل مقادیر زیاد مواد آلی را می‌توان ذکر کرد [۹].

در این تحقیق اندازه‌گیری رطوبت به دو روش:

الف) اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی میزان تضعیف پرتوی گاما به علت عبور از خاک

ب) اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی پرتوهای گامای پس‌پراکنده شده از سطح خاک

انجام شده است. البته باید توجه داشت که روش‌های دیگری نیز برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد اما ما در اینجا به همین چند نمونه اکتفا می‌کنیم.

۲-۳ محاسبه رطوبت به روش تضعیف پرتوهای گاما با استفاده از شبیه‌سازی مونت-کالو با کد MCNP-4C

کالو با کد MCNP-4C

۱-۲-۳ تضعیف پرتو گاما توسط خاک

یک باریکه موازی گاما در عبور از ماده تضعیف می‌شود که درصد آن به ضخامت و ضریب تضعیف خطی آن ماده بستگی دارد. با تغییر رطوبت خاک ضریب تضعیف خطی خاک، تغییر کرده و در نتیجه درصد تضعیف باریکه موازی گاما در عبور از آن، نسبت به حالت اول، تغییر می‌کند و از روی این تغییر می‌توان مقدار افزایش یا کاهش رطوبت خاک را بدست آورد. با توجه به این ویژگی در این کار به دنبال اندازه-گیری رطوبت خاک از روی میزان تضعیف پرتوی گاما توسط خاک هستیم [۱۰ تا ۱۴].

اگر یک باریکه موازی و خیلی باریک گاما از یک ماده‌ای به ضخامت x عبور کند مطابق با معادله بیر-لامبرت (Beer-Lambert) به صورت زیر تضعیف می‌شود [۱]:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (۱-۳)$$

که I و I_0 به ترتیب شدت اولیه و عبوری از ضخامت x و μ ضریب تضعیف خطی پرتوی گاما است. با تغییر رطوبت خاک تعداد عناصر هیدروژن و اکسیژن خاک و به تبع آن درصد وزنی تک تک عناصر موجود در خاک تغییر کرده و در نهایت سبب تغییر ضریب تضعیف خاک مرطوب، نسبت به حالت قبل از آن می‌شود و در نتیجه درصد باریکه موازی پرتوی گاما نسبت به حالت اول تغییر کرده و از روی این تغییر می‌توان اقدام به محاسبه رطوبت خاک کرد. برای یک ترکیب یا مخلوط، ضریب تضعیف جرمی (نسب ضریب تضعیف خطی به چگالی ماده، μ/ρ) از رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i} w_i \quad (۲-۳)$$

ρ_i, W_i, μ_i به ترتیب ضریب تضعیف خطی، کسر وزنی و چگالی حجمی هر ترکیب و μ و ρ چگالی و ضریب تضعیف خطی کل ماده می‌باشند.

خاک از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده است و رابطه (۳-۱) شامل سه جمله است.

$$\frac{\mu_{wet}}{\rho_{wet}} = \frac{\mu_s}{\rho_s} W_s + \frac{\mu_w}{\rho_w} W_w + \frac{\mu_a}{\rho_a} W_a \quad (3-3)$$

جمله سمت چپ تساوی مربوط به خاک مرطوب است که شامل سه فاز است و ρ_w, ρ_a, ρ_s و ρ_{wet} به ترتیب چگالی هوا، آب، خاک خشک و چگالی خاک مرطوب می‌باشد. μ_w, μ_s, μ_a و μ_{wet} به ترتیب ضرایب خطی هوا، آب، خاک خشک و مرطوب هستند و در نهایت W_w, W_s و W_a به ترتیب درصد وزنی فاز گاز، مایع و جامد در خاک مورد مطالعه می‌باشند. از رابطه (۳-۳) ضریب تضعیف خطی کل به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\mu_{wet} = \frac{\mu_s}{\rho_s} W_s \rho_{wet} + \frac{\mu_w}{\rho_w} W_w \rho_{wet} + \frac{\mu_a}{\rho_a} W_a \rho_{wet} \quad (4-3)$$

می‌دانیم نسبت جرم هر ماده به حجم آن برابر با چگالی آن ماده است. برای هوا:

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (5-3)$$

برای آب:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (6-3)$$

و برای خاک مرطوب:

$$\rho_{wet} = \frac{m_{wet}}{V_{wet}} \quad (7-3)$$

و نسبت جرم هر فاز به جرم کل کسر آن فاز در خاک است.

فاز جامد:

$$W_s = \frac{m_s}{m_{wet}} \quad (8-3)$$

فاز آب:

$$W_w = \frac{m_w}{m_{wet}} \quad (9-3)$$

فاز هوا:

$$W_a = \frac{m_a}{m_{wet}} \quad (10-3)$$

با استفاده از روابط (۳-۵) تا (۳-۱۰) و رابطه (۳-۴) داریم:

$$\begin{aligned} \mu_{wet} &= \frac{\mu_s}{\rho_s} \frac{m_s}{m_{wet}} \frac{m_{wet}}{V_{wet}} + \frac{\mu_w}{m_w/V_w} \frac{m_w}{m_{wet}} \\ &\times \frac{m_{wet}}{V_{wet}} + \frac{\mu_a}{m_a/V_a} \frac{m_a}{m_{wet}} \frac{m_{wet}}{V_{wet}} \end{aligned} \quad (11-3)$$

اگر تضعیف ناشی از فاز هوا را ناچیز بگیریم و از آن صرف نظر کنیم، پس از ساده‌سازی به رابطه (۳-a)-۳-۱۲ می‌رسیم و در صورتی که از آن صرف نظر نشود به رابطه (۳-b)-۱۲ می‌رسیم که در آن μ_s' ضریب تضعیف جرمی خاک خشک، W_{wet} حجم خاک مرطوب، m_s جرم خاک خشک، V_w و V_a به ترتیب حجم آب و حجم هوای موجود در خاک است.

$$\mu_{wet} = \mu_s' \frac{m_s}{V_{wet}} + \mu_w \frac{V_w}{V_{wet}} \quad (a)$$

$$\mu_{wet} = \mu_s' \frac{m_s}{V_{wet}} + \mu_w \frac{V_w}{V_{wet}} + \mu_a \frac{V_a}{V_{wet}} \quad (b) \quad (12-3)$$

بنا به تعریف نسبت جرم فاز جامد خاک به حجم خاک مرطوب را چگالی ظاهری خاک (ρ_s'),

$$\rho_s' = \frac{m_s}{V_{wet}} \quad (13-3)$$

نسبت حجم آب به حجم خاک مرطوب را رطوبت حجمی (θ_v),

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_{wet}} \quad (14-3)$$

نسبت جرم آب به جرم خاک مرطوب را رطوبت جرمی (U)،

$$U = \frac{M_w}{M_{wet}} \quad (15-3)$$

و نسبت حجم هوای موجود در خاک به حجم خاک مرطوب را هوای نسبی خاک مرطوب (θ_a)،

$$\theta_a = \frac{V_a}{V_{wet}} \quad (16-3)$$

می‌نامیم. پس رابطه‌ی (۱-۳) به دو صورت زیر در می‌آید [۱۰]:

$$I = I_0 \exp \left[-(\mu'_s \rho'_s + \theta_v \mu_w) x \right] \quad (a) \quad (17-3)$$

$$I = I_0 \exp \left[-(\mu'_s \rho'_s + \theta_v \mu_w + \theta_a \mu_a) x \right] \quad (b)$$

با توجه به اینکه چگالی آب یک است، پس ضریب تضعیف خطی آب با ضریب جرمی آن برابر می‌باشد. در نهایت وقتی یک باریکه خیلی نازک و موازی از پرتوهای گاما از یک نمونه خاک به ضخامت x عبور کند تضعیف مربوط به این باریکه از یکی از دو رابطه (۱۷-۳) پیروی می‌کند که بستگی به نادیده گرفتن یا نگرفتن فاز گازی خاک دارد. لذا می‌توان با داشتن مقادیر x ، μ_w ، $\mu'_s \rho'_s$ و $\mu_a \theta_a$ رطوبت حجمی را از دو رابطه زیر بدست آورد:

$$\theta_v = \frac{-1}{x \mu_w} \left[\text{Ln} \left(\frac{I}{I_0} \right) + \rho'_s \mu'_s x \right] \quad (a) \quad (18-3)$$

$$\theta_v = \frac{-1}{x \mu_w} \left[\text{Ln} \left(\frac{I}{I_0} \right) + \rho'_s \mu'_s x + \theta_a \mu_a x \right] \quad (b)$$

از آنجا که ما در این تحقیق اثر فاز گاز خاک را هم در نظر گرفته‌ایم از فرمول (۱۸-۳-b) استفاده می‌شود. با استفاده از کد MCNP-4C برای یک ضخامت مشخص (x) از خاک مورد مطالعه و مشخص بودن مقادیر μ_w ، $\mu'_s \rho'_s$ و $\theta_a \mu_a$ می‌توان با بدست آوردن نسبت شار عبور کرده به شار اولیه برای پرتوهای گاما با یک انرژی خاص و با قرار دادن مقادیر فوق در رابطه (۱۸-۳) مقدار رطوبت حجمی (θ_v) را بدست آورد.

۲-۲-۳ شبیه سازی با کد MCNP- 4C و بدست آوردن رطوبت از روش تضعیف

برای شبیه سازی مسئله، یک دسته پرتوی موازی گاما را با انرژی‌های مختلف در نظر گرفته و سپس این دسته پرتوی موازی را طرف یک استوانه خاک گسیل نموده و بعد از عبور از خاک در محل آشکارساز مورد مطالعه قرار می‌دهیم (شکل ۳-۵). در ابتدای کار، شعاع دسته موازی پرتوی گاما را کوچک و با مقطع 0.0001 cm و انرژی‌های مشخص شده در جدول ۳-۳، آشکارساز CsI (TI) با ابعاد $1 \times 2 \text{ in}$ (قطر 1 in و طول 2 in) و نمونه خاک تجربی با ویژگی‌های که در دو جدول ۳-۱ و ۳-۲ آورده شده است، را در نظر گرفته (محور آشکارساز، استوانه خاک و بردار عمود بر سطح چشمه در یک راستا قرار دارند) و فایل ورودی را برای کد MCNP- 4C می‌نویسیم.



شکل ۳-۵ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش تضعیف

جدول ۳-۱ کسر وزنی عناصر موجود در نمونه خاک مورد مطالعه [۱۵].

عنصر	H	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
کسر وزنی	0.03760	0.05936	0.55856	0.00075	0.03627	0.0094	0.3456	0.00083	0.04494	0.02381

جدول ۳-۲ مشخصه‌های خاک تجربی [۱۵].

چگالی خاک	$1.56 \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$
pH	8.72
رطوبت	% 0.634

در فایل ورودی کد، خروجی مورد نظر را تالی F2 معرفی می‌کنیم به عبارتی شار سطحی را بدست می‌آوریم. آشکارساز باید پرتوهای را شمارش کند که انرژی آنها برابر با انرژی پرتوهای گسیل شده از چشمه باشند. اما آشکارساز تمام پرتوهای گاما را با هر انرژی شمارش می‌کند و این مد نظرمان نیست. به این منظور ابتدا باید انرژی‌ای که قرار است تالی مورد نظر در آن ثبت شود (E') را کمی بیشتر از انرژی چشمه گرفته (E) یعنی $E < E'$ و انرژی بدست آمده را به n بازه تقسیم کرده ($\Delta E = E' / n$) و تالی F2 را در این بازه‌ها با اجرا کردن کد بدست می‌آوریم و در نهایت تالی مورد نظر را در بازه‌ای که انرژی چشمه در آن قرار دارد یادداشت می‌کنیم. البته باید توجه داشت که اندازه بازه‌ها طوری در نظر گرفته شود که خطای ناشی از آن کمتر از خطای آماری هر بازه شود.

خطای آماری که تالی F2 در هر بازه دارد $\Delta E <$

برای بدست آوردن رطوبت از روی F2 ابتدا آن را به شار تبدیل کرده (اگر F2 در مساحت پنجره آشکارساز، S ضرب شود شار را به ما می‌دهد) که برابر با مقدار I / I_0 در رابطه (۳-۱۸) است.

$$\frac{I}{I_0} = S \times F2 \quad (۳-۱۹)$$

با توجه به معادله (۳-۱۸-b) باید مقادیر μ_w ، $\mu'_s \rho'_s$ ، μ_a و θ_a و x معلوم باشد تا بتوان رطوبت را اندازه‌گیری کرد. اما در مورد این نمونه تجربی، مقادیر در انرژی‌های $\mu'_s \rho'_s$ و $\theta_a \mu_a$ را نداریم. با توجه به این نکته که رطوبت اولیه خاک معلوم است، می‌توان برای یک ضخامت معین خاک و انرژی معلوم چشمه، تالی F2 را بدست آورد و از روی آن و با رابطه (۳-۱۸-b) و مشخص بودن سایر مقادیر، مقدار $\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s$ بدست می‌آید. این کار برای چند انرژی انجام شده و نتایج آن در جدول ۳-۳ آورده شده است.

جدول ۳-۳ مقادیر $\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s$ در انرژی های مختلف.

انرژی (MeV)	F2(N.cm ⁻²)	خطای نسبی F2	$\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s$ (cm ⁻¹)
0.05	0.150572	0.0000	0.539784
0.10	0.158636	0.0000	0.271929
0.50	0.159943	0.0001	0.139504

اگر یک رطوبت معین به نمونه خاک اضافه کنیم، این افزایش رطوبت باعث تغییر چگالی خاک و کسر وزنی عناصر موجود در آن به صورت زیر می شود.

اگر چگالی اولیه خاک ρ_i و چگالی نهایی خاک بعد از افزایش رطوبت به اندازه θ_m % برابر با ρ_f باشد، چگالی نهایی را می توان از روی چگالی اولیه بدست آورد:

$$\rho_f = \rho_i \left(1 + \frac{\theta_m \%}{100} \right) \quad (20-3)$$

با داشتن چگالی نهایی می توان کسر وزنی جدید را برای عناصر موجود در خاک بدست آورد. در این جا θ_m نسبت جرم آب اضافه شده به جرم خاک خشک تعریف می شود.

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_{dry}} \quad (21-3)$$

می دانیم کسر وزنی یک عنصر در ماده برابر با نسبت چگالی آن عنصر به چگالی ماده است.

$$W = \frac{\rho}{\rho_i} \quad (22-3)$$

که در آن ρ چگالی عنصر مورد نظر و ρ_i چگالی کل ترکیب است. کسر وزنی عناصر خاک قبل از اضافه کردن آب به آن:

$$W_H = \frac{\rho_H}{\rho_i}, \quad W_C = \frac{\rho_C}{\rho_i}$$

$$W_O = \frac{\rho_O}{\rho_i}, \quad W_{Si} = \frac{\rho_{Si}}{\rho_i}$$

$$, W_{Fe} = \frac{\rho_{Fe}}{\rho_i} \quad W_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_i}$$

$$, W_K = \frac{\rho_K}{\rho_i} W_{Ca} = \frac{\rho_{Ca}}{\rho_i}$$

$$, W_{Mg} = \frac{\rho_{Mg}}{\rho_i} W_{Na} = \frac{\rho_{Na}}{\rho_i} \quad (23-3)$$

بعد از اضافه کردن آب به خاک افزایش چگالی H و O از روابط زیر بدست می آید.

$$\rho'_H = 0.1112 \times (\rho_f - \rho_i) \quad (24-3)$$

که در آن 0.1112 کسر وزنی هیدروژن

$$\rho'_O = 0.8888 \times (\rho_f - \rho_i) \quad (25-3)$$

و 0.8888 کسر وزنی اکسیژن در آب است. برای چگالی نهایی H و O در خاک بعد افزایش رطوبت داریم:

$$\rho''_O = \rho'_O + \rho_O$$

$$\rho''_H = \rho'_H + \rho_H \quad (26-3)$$

پس می توان با توجه معادله ۳-۲۲ کسر وزنی های جدید را بدست آورد.

$$W'_C = \frac{\rho_C}{\rho_f}, W'_H = \frac{\rho''_H}{\rho_f}$$

$$, W'_{Si} = \frac{\rho_{Si}}{\rho_f}, W'_O = \frac{\rho''_O}{\rho_f}$$

$$W'_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_f}, W'_{Fe} = \frac{\rho_{Fe}}{\rho_f}$$

$$, W'_K = \frac{\rho_K}{\rho_f}, W'_{Ca} = \frac{\rho_{Ca}}{\rho_f}$$

$$, W'_{Mg} = \frac{\rho_{Mg}}{\rho_f}, W'_{Na} = \frac{\rho_{Na}}{\rho_f} \quad (27-3)$$

بعد از اضافه کردن مقدار معین رطوبت به خاک و با داشتن مقدار $\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s$ از جدول ۳-۳ و وارد

کردن چگالی و کسر های وزنی جدید خاک از جدول های ۳-۴ و ۳-۵، با استفاده از شبیه سازی مونت-

کارلو، مقدار رطوبت را اندازه گیری می کنیم (در این مرحله تنها با انرژی های محدود و برای چند رطوبت

خاص اندازه گیری را انجام می دهیم. تا بررسی کنیم که آیا با کد می توان رطوبت را اندازه گرفت یا نه). در

ادامه کار برای انرژی‌های داده شده در جدول ۳-۳ رطوبت‌های مختلف را بدست می‌آوریم نتایج در جداول ۳-۴، ۳-۵ و ۳-۶ آورده شده است.

جدول ۳-۴ چگالی‌های جدید خاک بعد از افزایش رطوبت

رطوبت	2.194	8.434	16.234	31.834
چگالی (g/cm^3)	1.5756	1.683	1.716	1.872

جدول ۳-۵ کسر وزنی‌های جدید عناصر خاک بعد از افزایش رطوبت

رطوبت عناصر	2.194	8.434	16.234	31.834
H	0.033685	0.034452	0.037372	0.04659
C	0.053179	0.052652	0.050647	0.044316
O	0.500403	0.504249	0.518902	0.565151
Si	0.309616	0.306550	0.294872	0.258013
Al	0.008421	0.008338	0.00802	0.007018
Fe	0.021331	0.02112	0.020315	0.017776
Ca	0.039455	0.039064	0.037576	0.032879
K	0.000744	0.000737	0.000709	0.000620
Na	0.000672	0.000665	0.00064	0.000560
Mg	0.032494	0.032172	0.030947	0.027078

جدول ۳-۶ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده با چشمه‌ای به انرژی (0.05 MeV)

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	F2(N. cm ⁻²)	خطای نسبی تالی F2	رطوبت بدست آمده با کد MCNP (%)	رطوبت خاک جدید (%)
8.11	0.150300	0.0001	2.372	2.194
0.007	0.149267	0.0001	8.3699	8.434
0.031	0.147975	0.0000	16.7289	16.234

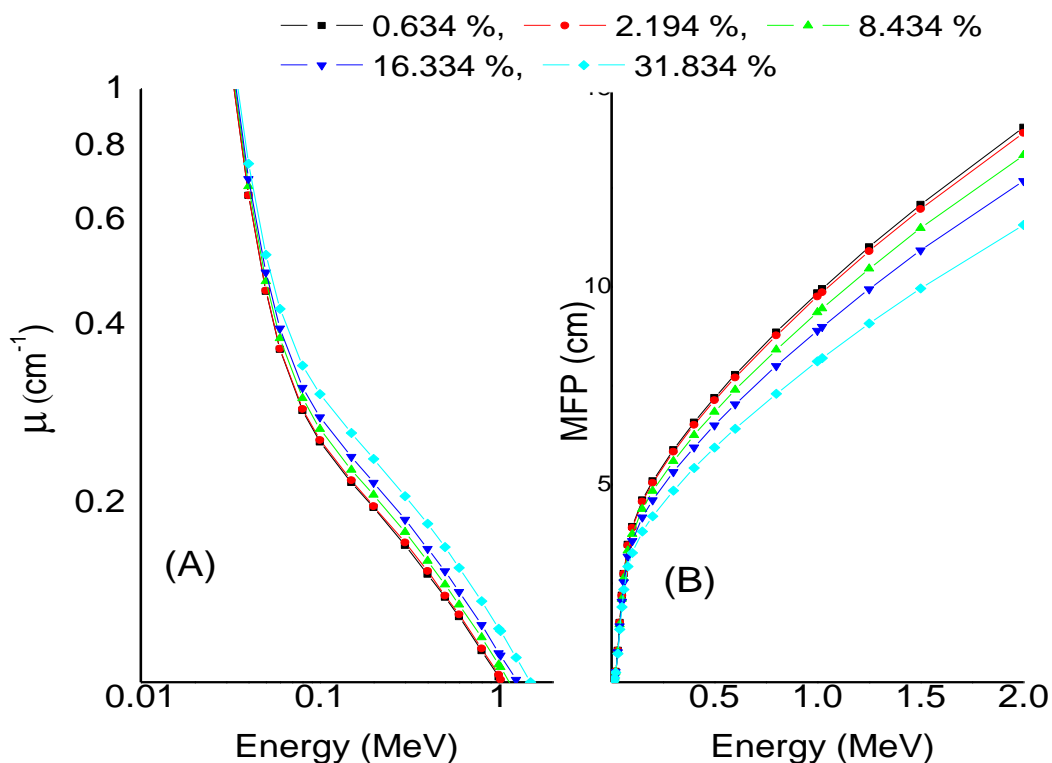
جدول ۷-۳ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده با چشمه‌ای به انرژی (0.1 MeV)

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	F2(N.cm ⁻²)	خطای نسبی تالی F2	رطوبت بدست آمده با کد MCNP (%)	رطوبت خاک جدید (%)
0.592	0.158307	0.0001	2.207	2.194
2.350	0.15697	0.0000	8.6322	8.434
1.509	0.155323	0.0000	15.9889	16.234

جدول ۸-۳ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده با چشمه‌ای به انرژی (0.5 MeV)

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	F2(cm ⁻²)	خطای نسبی تالی F2	رطوبت بدست آمده با کد MCNP (%)	رطوبت خاک جدید (%)
0.14	0.159981	0.0001	2.197	2.194
0.77	0.158145	0.0000	8.369	8.434
0.006	0.156368	0.0000	16.235	16.234

شکل ۶-۳ نمودار تضعیف خطی خاک مورد مطالعه بر حسب انرژی در رطوبت‌های مشخص شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در انرژی‌های بالاتر، اختلاف بین ضریب تضعیف خاک با رطوبت‌های متفاوت بیشتر می‌شود و لذا تشخیص و تفکیک آنها بهتر است. با توجه به نتایج جداول ۶-۳، ۷-۳ و ۸-۳ کمترین خطای اندازه‌گیری را در انرژی 0.5 MeV داریم. در ادامه با چشمه‌های واقعی کار کرده و رطوبت خاک را از مقادیر کم تا زیاد با استفاده از کد MCNP-4C بدست می‌آوریم.



شکل ۳-۶ نمودار (A) و (B) به ترتیب ضریب تضعیف خطی خاک و پویش آزاد متوسط بر حسب انرژی پرتو گاما برای رطوبت‌های متفاوت خاک است [۳].

۳-۲-۳ محاسبه رطوبت خاک با چشمه‌های موجود در آزمایشگاه

در این قسمت به دنبال پیدا کردن بهترین چشمه برای اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از کد MCNP-4C هستیم. لیست چشمه‌ها در جدول ۳-۹ بیان شده است.

تمام چشمه‌ها به جز سزیم دارای توزیع انرژی می‌باشند تنها تفاوت این ورودی با ورودی قسمت قبل در همین توزیع انرژی چشمه‌ها است. بعد از اجرای کد ورودی مانند قبل ابتدا مقدار عبارت $\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s$ برای انرژی‌های مختلف بدست آورده که نتایج آن در جدول ۳-۹ آورده شده است. در انرژی‌های مورد نظر رطوبت از مقادیر کم تا زیاد توسط شبیه‌سازی مونت کارلو بدست آمد و نتایج را در جدول‌های ۳-۱۰ تا

۳-۱۵ بیان شده است

جدول ۳-۹ چشمه‌های مورد مطالعه [۱۶]

چشمه	نیمه عمر	انرژی (MeV)	احتمال %	ΔE (MeV)
^{241}Am	432.20 سال	0.02634	0.0627	0.000001
		0.033205	0.0034	
		0.059537	0.9339	
^{137}Cs	30.00 سال	0.662	1	0.00001
^{65}Zn	244.26 روز	0.511	0.05261	0.0001
		1.1155	0.9474	
^{22}Na	2.609 سال	0.511	0.6427	0.0001
		1.2745	0.3573	
^{60}Co	5.271 سال	1.1732	0.4999	0.0001
		1.3325	0.5001	
^{192}Ir	73.831 سال	0.1363	0.0008	0.0001
		0.2013	0.0022	
		0.2058	0.0152	
		0.2833	0.0012	
		0.2960	0.0012	
		0.3085	0.1322	
		0.3165	0.1384	
		0.3745	0.3819	
		0.4165	0.0033	
		0.2206	0.4681	
		0.4846	0.0147	
		0.4890	0.0020	
		0.5886	0.0208	
		0.6044	0.0379	
0.6125	0.0245			
0.8845	0.0013			

جدول ۳-۱۰ مقادیر $\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s$ در انرژی های مختلف

شعاع باریکه گاما	$F2(N.cm^{-2})$	خطای نسبی تالی $F2(N.cm^{-2})$	$\theta_a \mu_a + \mu'_s \rho'_s (cm^{-1})$	چشمه
0.25	0.1491730	0.0000	0.55855	²⁴¹ Am
0.45	0.11503700	0.0000	0.12335	¹³⁷ Cs
0.20	0.1454080	0.0000	0.11705	⁶⁵ Zn
0.30	0.0537726	0.0001	0.43301	²² Na
0.25	0.0757263	0.0001	0.31890	⁶⁰ Co
0.20	0.000200202	0.0012	2.99706	¹⁹² Ir

جدول ۳-۱۱ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده برای

چشمه ²⁴¹Am

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	تالی $F2(N.cm^{-2})$	خطای نسبی تالی $F2(N.cm^{-2})$	رطوبت بدست آمده با کد رطوبت واقعی خاک (%) MCNP-4C	رطوبت واقعی خاک (%)
6.007	0.148937	0.0000	2.326	2.194
4.834	0.148465	0.0000	5.571	5.314
5.149	0.147990	0.0000	8.868	8.434
5.451	0.146822	0.0000	17.119	16.234
3.974	0.145668	0.0000	25.307	24.034

جدول ۳-۱۲ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده برای

چشمه ¹³⁷Cs

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	تالی $F2(N.cm^{-2})$	خطای نسبی تالی $F2(N.cm^{-2})$	رطوبت بدست آمده با کد رطوبت واقعی خاک (%) MCNP-4C	رطوبت واقعی خاک (%)
0.316	0.153626	0.0000	2.187	2.194
0.729	0.152812	0.0000	5.275	5.314
0.732	0.152000	0.0000	8.372	8.434
0.499	0.149979	0.0000	16.153	16.234
0.592	0.147996	0.000	23.889	24.034

جدول ۳-۱۳ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده برای

چشمه ی ^{65}Zn

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	تالی (N. cm ⁻²) F2	خطای نسبی تالی F2	رطوبت بدست آمده با کد رطوبت (%) MCNP-4C	رطوبت واقعی خاک (%)
1.925	0.145408	0.0000	2.152	2.194
1.932	0.144232	0.0000	5.211	5.314
2.015	0.143453	0.0000	8.264	8.434
3.217	0.141572	0.0000	15.712	16.234
3.280	0.139620	0.0000	23.307	24.034

جدول ۳-۱۴ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده برای

چشمه ی ^{22}Na

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	تالی (N. cm ⁻²) F2	خطای نسبی تالی F2	رطوبت بدست آمده با کد رطوبت (%) MCNP-4C	رطوبت واقعی خاک (%)
3.809	0.0536067	0.0001	2.278	2.194
5.159	0.0533043	0.0001	5.287	5.314
8.231	0.0529829	0.0002	8.503	8.434
0.0061	0.0522183	0.0002	16.235	16.234
1.844	0.0514721	0.0002	23.891	24.034

جدول ۳-۱۵ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده برای

چشمه ی ^{60}Co

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	تالی (N. cm ⁻²) F2	خطای نسبی تالی F2	رطوبت بدست آمده با کد رطوبت (%) MCNP-4C	رطوبت واقعی خاک (%)
0.43	0.0755079	0.00001	2.304	2.194
0.00	0.0750770	0.0001	5.314	5.314
0.38	0.0746516	0.0001	8.402	8.434
0.54	0.0735954	0.0001	16.146	16.234
1.821	0.0725532	0.0001	23.897	24.034

جدول ۳-۱۶ میزان دقت در تشخیص رطوبت اولیه توسط شبیه سازی مونت کارلو در مقابل رطوبت اضافه شده برای

چشمه ی ^{192}Ir

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	تالی (N. cm ⁻²) F2	خطای نسبی تالی F2	رطوبت بدست آمده با کد (%) MCNP-4C	رطوبت واقعی خاک (%)
24.102	0.000199664	0.0012	1.665	2.194
12.817	0.000198643	0.0012	4.633	5.314
5.983	0.000197515	0.0012	7.923	8.434
3.192	0.00019484	0.0012	15.158	16.234
3.280	0.000192341	0.0012	23.295	24.034

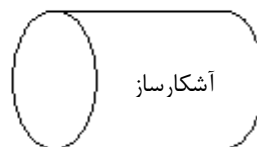
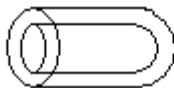
همان طور که در قسمت قبل نیز نتیجه گرفتیم کمترین خطا مربوط به چشمه‌های با بیشترین انرژی یعنی ^{60}Co و بیشترین خطای اندازه‌گیری مربوط به چشمه ^{192}Ir می‌باشد زیرا بیشترین توزیع انرژی را در بین چشمه‌های لیست شده در جدول ۳-۹ داراست.

برای اندازه‌گیری رطوبت در آزمایشگاه باید خاک را داخل ظرف بریزیم در ادامه به دنبال پیدا کردن اثر تضعیف ناشی از ظرف هستیم.

۳-۲-۴ اثر ظرف در اندازه‌گیری رطوبت و شبیه‌سازی آن

برای مطابقت با واقعیت، این بار در شبیه‌سازی برای خاک یک ظرف در نظر گرفته شده است (شکل ۳-۷). ظرف پلاستیکی استفاده شده، ترکیبی از ۷۵٪ کپلیمر استایرن و ۲۵٪ آکریلونیتریل با فرمول $\text{C}_{27}\text{H}_{27}\text{N}$ ، چگالی 1.08 g/cm^3 و معروف به SAN است [۱۷ و ۱۸]. ظرف مورد استفاده لوله آزمایشی با قطر داخلی ۰.۵ cm و قطر خارجی ۰.۶۵ cm و طول‌های متفاوت برای چشمه‌های مختلف می‌باشد. البته از آنجا که تمام پرتوها مسیر یکسانی را داخل لوله آزمایش طی نمی‌کنند (به علت منحنی بودن انتهای آن)، شعاع باریکه را آنقدر کوچک در نظر می‌گیریم تا خطای ناشی از یکسان در نظر گرفتن مسیر برای پرتوها در خطای آماری مربوط به تالی F2 حذف شود.

باریکه موازی



ظرف در نظر گرفته شده برای خاک مورد مطالعه

شکل ۳-۷ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وقتی برای خاک ظرف در نظر گرفته می‌شود

از رابطه (۳-۱) داریم:

$$Ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu x \quad (3-28)$$

با توجه به رابطه (۳-۱۹) می‌توان رابطه (۳-۲۸) را به صورت زیر نوشت.

$$Ln(F2 \times S) = -\mu x \quad (3-29)$$

اگر از طرفین رابطه بالا مشتق بگیریم و متغیرها $F2$ و x باشند، داریم:

$$\frac{\Delta F2}{F2} = -\mu \Delta x \quad (3-30)$$

μ مقداری ثابت، در مورد این دو چشمه مرتبه آن دهم است و Δx تغییرات در مسیر طی شده توسط

پرتوهای گاما در ماده است که به علت منحنی بودن انتهای لوله آزمایش ایجاد می‌شود. همان‌طور که

گفته شد شعاع باریکه را طوری در نظر می‌گیریم که:

$$\Delta x < \frac{\Delta F2}{F2} \frac{1}{\mu} \quad (3-31)$$

حضور ظرف سبب افزایش تضعیف باریکه گاما می‌شود و این اثر دقت اندازه‌گیری رطوبت را کاهش می‌-

دهد. برای بدست آوردن تضعیف پرتوهای گامای ناشی از حضور ظرف خاک، ابتدا ظرف بدون خاک را در

سامانه اندازه‌گیری رطوبت قرار داده، سپس شار رسیده به پنجره آشکارساز را ثبت می‌کنیم و در مرحله

دوم همین فرایند را بدون حضور ظرف انجام می‌دهیم و از تفاضل این دو، تضعیف پرتوهای گامای ناشی از

حضور ظرف به تنهایی بدست می‌آید (جدول ۳-۱۷). شبیه‌سازی را با شرایط قبلی و با دو چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co انجام می‌دهیم.

جدول ۳-۱۷ مقادیر F2 در دو حالت به همراه شار تضعیف شده ناشی از حضور ظرف برای دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs

چشمه	تالی $F2(\text{N.cm}^{-2})$ برای وقتی ظرف خالی است	خطای نسبی تالی F2 وقتی ظرف خالی است	تالی $F2(\text{N.cm}^{-2})$ بدون حضور ظرف است	خطای نسبی تالی F2 بدون حضور ظرف	تضعیف ناشی از ظرف
^{60}Co	0.193723	0.0001	0.1937353	0.0001	0.001296
^{137}Cs	0.0973920	0.0001	0.0986882	0.0001	0.003633

حال اگر نمونه خاک درون ظرف را در سامانه قرار داده و شار سطحی روی پنجره آشکارساز را بدست آوریم و اثر ظرف خاک (که در ابتدا محاسبه شد) را از آن کم کنیم تضعیف شار ناشی از خاک به تنهایی بدست می‌آید و می‌توان رطوبت را بدست آورد. نتایج آن در جدول‌های ۳-۱۸ و ۳-۱۹ آورده شده است.

۳-۱۸ مقایسه میزان دقت کد در تشخیص رطوبت و خطای ناشی از اثر ظرف با چشمه ^{137}Cs

رطوبت واقعی خاک (%)	رطوبت بدست آمده از کد بدون ظرف (%)	خطای نسبی بین مقدار واقعی و مقدار بدست آمده از بدون ظرف (%)	رطوبت بدست آمده از کد همراه ظرف (%)	خطای نسبی بین مقدار واقعی و مقدار بدست آمده از همراه ظرف (%)
1.192	2.152	1.896	2.135	2.686
5.314	5.178	2.551	5.176	2.601
8.434	8.249	2.759	8.119	3.727
16.234	15.878	2.987	115.612	3.831
24.034	23.481	4.087	23.143	4.919

۱۹-۳ مقایسه میزان دقت کد در تشخیص رطوبت و خطای ناشی از اثر ظرف با چشمه ^{60}Co

خطای نسبی بین مقدار واقعی و مقدار بدست آمده از همراه ظرف (%)	رطوبت بدست آمده از کد همراه ظرف (%)	خطای نسبی بین مقدار واقعی و مقدار بدست آمده از بدون ظرف (%)	رطوبت بدست آمده از کد بدون ظرف (%)	رطوبت واقعی خاک (%)
1.201	2.168	1.896	2.155	0
0.898	5.266	0.121	5.201	5.314
3.052	8.177	2.759	8.249	8.434
3.320	15.695	2.987	15.878	15.234
3.749	23.427	4.087	23.481	24.034

در این قسمت به دنبال حذف اثر ظرف و تاثیر آن بر روی رطوبت محاسبه شده بودیم. در اینجا از ظرف پلاستیکی به خاطر چگالی پایین آن استفاده کردیم؛ این ویژگی باعث تضعیف کمتر پرتوهای گاما شده و در نتیجه خطای کمتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک ایجاد می‌کند. با توجه به جدول‌های ۱۸-۳ و ۱۹-۳ مشاهده می‌شود که خطای اندازه‌گیری با چشمه ^{60}Co کمتر است زیرا مسافت آزاد میانگین پرتوهای گامای این چشمه (1.17 و 1.33) در مقایسه با پرتوهای گامای چشمه ^{137}Cs (0.66 MeV) بیشتر است و این سبب می‌شود در طی مسافت یکسان پرتوهایی که از چشمه ^{60}Co گسیل می‌شوند تعداد برهمکنش‌های کمتری را نسبت به پرتوهای گسیل شده از چشمه ^{137}Cs انجام دهند و در نتیجه تاثیر ظرف خاک بر روی تضعیف پرتوی گاما کمتر شده و به تبع آن خطای محاسبه رطوبت کاهش می‌یابد. در ادامه کار به اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی پرتوهای پس‌پراکنده شده از سطح خاک می‌پردازیم.

۳-۳ محاسبه رطوبت خاک با استفاده از پس‌پراکندگی پرتوهای گاما

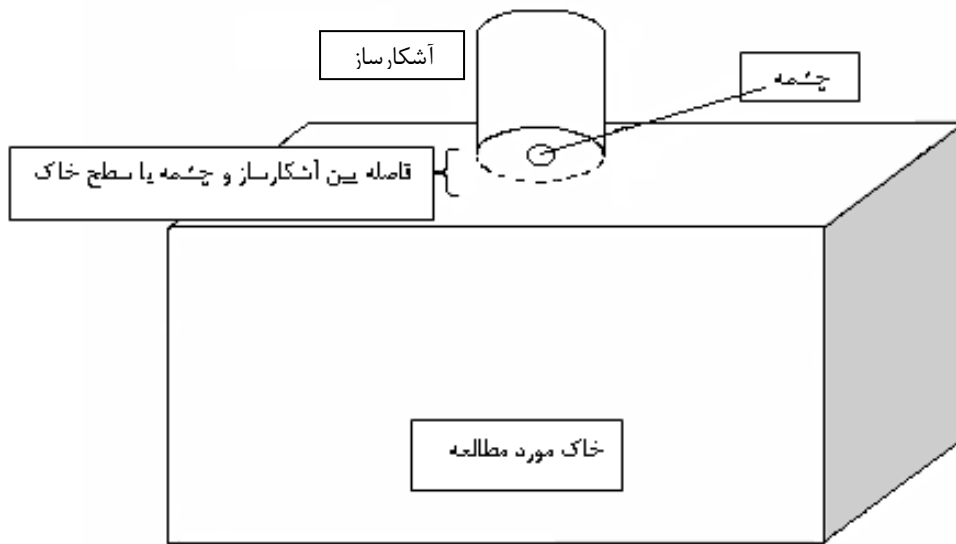
روشی دیگر برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، اندازه‌گیری با استفاده از پرتوهای گامای پس‌پراکنده شده از سطح خاک است. اندازه‌گیری با این روش در موادی مثل چوب، کاغذ و آجر انجام شده است [۱۹ تا ۲۱]. در فصل یک اشاره شد که برهم‌کنش‌های پرتوی گاما با ماده عمدتاً شامل پدیده‌های فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج است. در پراکندگی کامپتون، هم انرژی و هم جهت پرتوی فرودی تغییر می‌کند

(فصل اول). در صورتی که زاویه پراکندگی بیشتر از 90° باشد، پس پراکندگی کامپتون رخ می‌دهد. در این قسمت ابتدا با معرفی کمیتی به نام کنتراست به بررسی تغییرات آن نسب رطوبت می‌پردازیم. کنتراست، معرف اختلاف نسبی به درصد، بین کمیت مورد مطالعه در یک وضعیت نسبت به وضعیت مرجع است و به صورت ذیل بیان می‌شود [۲۱]:

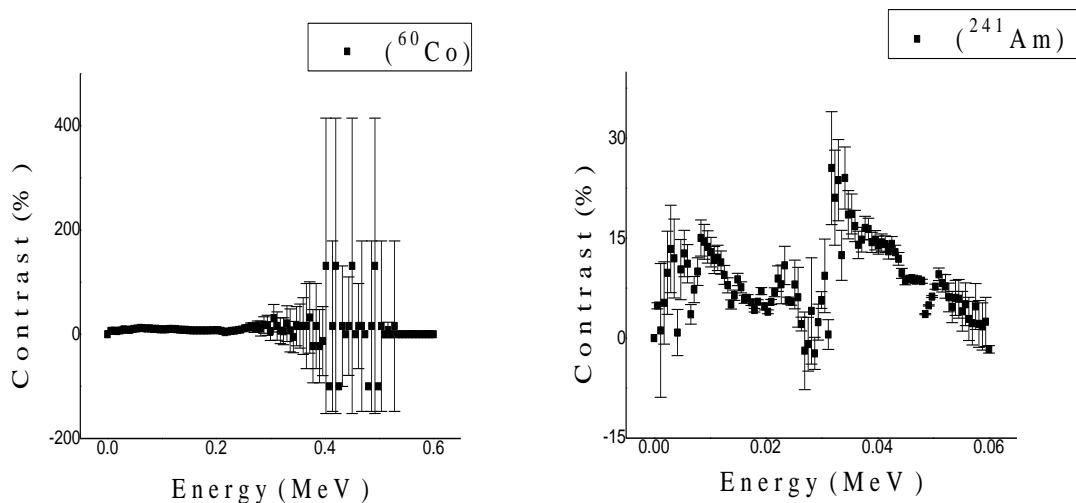
$$\text{Contrast (\%)} = \frac{C' - C}{C} \times 100 \quad (32-3)$$

۱-۳-۳ شبیه‌سازی مسئله با کد MCNP- 4C

برای شبیه‌سازی این قسمت از خاک تجربی که مشخصه‌ها و درصد وزنی‌های آن در جداول ۱-۳ و ۲-۳ آمده (خاک مورد مطالعه مکعبی با ابعاد $50 \times 70 \times 50 \text{ cm}^3$) استفاده کرده، آشکارساز نیز همان CsI(Tl) با ابعاد $1 \times 2 \text{ in}$ می‌باشد (قطر 1 in و طول 2 in). برای بررسی اولیه چشمه ^{60}Co که بیشترین انرژی را در بین چشمه‌های آزمایشگاه و ^{241}Am که کمترین انرژی را داراست، به صورت یک چشمه مسطح موازی از پرتوهای گاما با شعاع 0.25 cm در نظر گرفته می‌شود (جدول ۳-۷). چشمه را روی پنجره آشکارساز و آنها را روی سطح خاک در فاصله 1 cm قرار می‌دهیم (شکل ۳-۸ (A) و ۳-۸ (B)). خروجی که از شبیه‌سازی مونت کارلو دریافت می‌کنیم تالی F8 است.



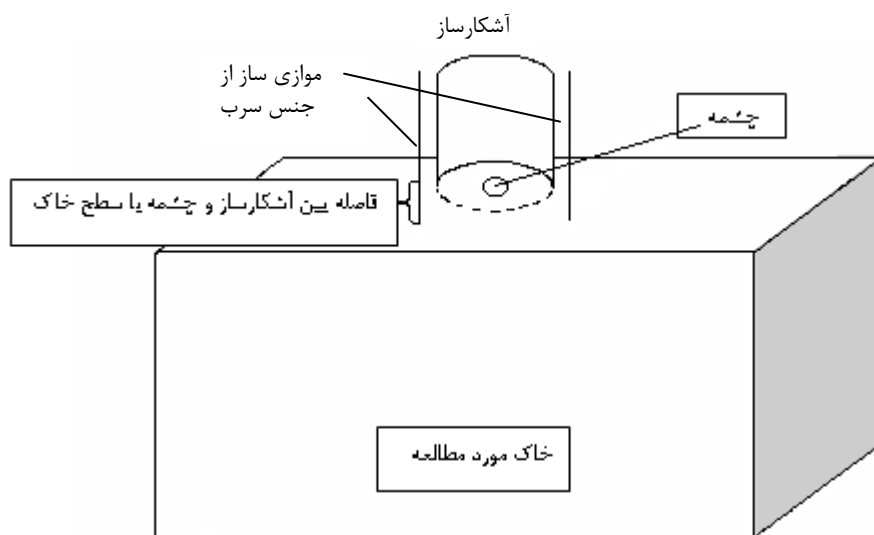
شکل ۳-۸ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی پرتوهای پراکنده شده از سطح خاک، محیط خلاء ابتدا تالی F8 برای دو چشمه مورد نظر در رطوبت اولیه 0.01٪ ثبت می‌شود که همان مقدار C مشخص شده در رابطه (۳-۲۸) می‌باشند. در مرحله بعد رطوبت را به 10٪ رسانده، که در این حالت تالی ثبت شده همان مقادیر C' در معادله (۳-۲۸) هستند. مقدار کنتراست را برای تمام بازه‌های انرژی توسط یک برنامه فرترن محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۳-۹ داده شده است.



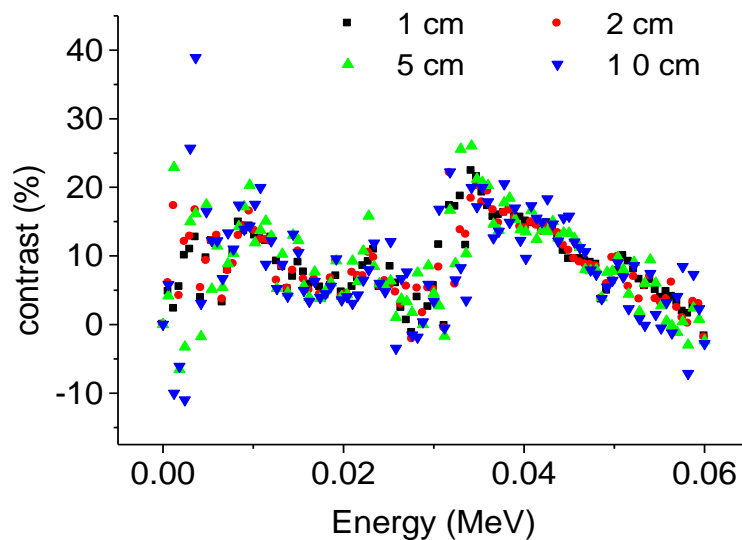
شکل ۳-۹ نمودار کنتراست بر حسب انرژی برای دو چشمه ^{60}Co و ^{241}Am . فاصله چشمه-آشکارساز سطح خاک 1 cm

با توجه به شکل ۳-۹ از آنجا که خطای کنتراست برای چشمه ^{60}Co با وجود زیاد بودن زمان اجرای برنامه، آن چنان بالاست که بررسی تغییرات کنتراست بر حسب انرژی برای این چشمه امکان پذیر نیست این چشمه را کنار گذاشته و با چشمه ^{241}Am که مقادیر کنتراست آن با خطای منطقی بدست می آید کار می کنیم.

برای اینکه ورود پرتوهایی که چندین بار پراکنده شدند به آشکارساز کم شود برای آن یک موازی ساز طراحی می کنیم که تا سطح خاک ادامه دارد (شکل ۳-۱۰). بعد از طراحی آن و اجرا کردن کد، مقدار کنتراست را برای تالی F8 در دو رطوبت قبلی و در فواصل ذکر شده محاسبه کرده که نتایج آن در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است.



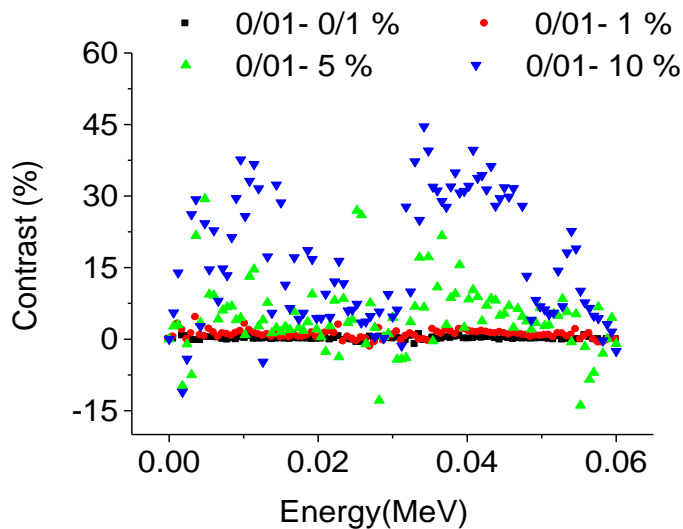
شکل ۳-۱۰ سامانه شبیه سازی شده برای اندازه گیری رطوبت خاک از روی پرتوهای پراکنده شده از سطح خاک، محیط خلاء و برای آشکارساز یک موازی ساز طراحی شده است.



شکل ۳-۱۱ نمودار کنتراست تالی F8 برحسب انرژی برای ^{241}Am با طراحی موازی ساز برای آشکارساز.

در نهایت در این قسمت کنتراست برای رطوبت‌های مختلف بدست آورده و با توجه به شکل ۳-۱۲ ملاحظه می‌شود که با افزایش رطوبت، مقدار کنتراست افزایش می‌یابد و کد، رطوبت را از مقادیر کوچک تا مقادیر زیاد تشخیص می‌دهد. در ادامه به دنبال پیدا کردن رابطه‌ای برای رطوبت بر حسب کنتراست

هستیم.



شکل ۳-۱۲ نمودار کنتراست تالی F8 برحسب انرژی بین رطوبت اولیه 0.01 % و رطوبت‌های مشخص شده در شکل.

۳-۲-۳ رابطه بین کنتراست و رطوبت

انرژی پرتوهای گامای پراکنده شده در زاویه θ نسبت به راستای فرودی پرتوها با رابطه زیر داده می‌شود (فصل اول).

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{1 + (1 - \cos \theta) \frac{E_{\gamma}}{m_0 c^2}} \quad (3-33)$$

که در آن E_{γ} و E_{γ}' به ترتیب انرژی پرتوهای فرودی، انرژی پرتوهای پراکنده شده در زاویه θ ، $m_0 c^2$ جرم سکون الکترون است. در این رابطه اگر $\alpha = E_{\gamma} / m_0 c^2$ قرار گیرد و E_{γ} طوری انتخاب شود که در مقابل $m_0 c^2$ خیلی کوچک باشد در این صورت می‌توان از عبارت $(1 - \cos \theta) \alpha$ (که حداکثر مقدار این رطوبت می‌تواند $2a$ باشد) در مقابل 1 ، در منحنی رابطه (۳-۳۳) صرف نظر کرده و در این صورت انرژی پرتوهای پراکنده شده از زاویه پراکندگی مستقل است البته باید توجه داشت که این تنها به طور نظری امکان‌پذیر است.

اگر توسط یک چشمه رادیواکتیو، پرتوهای گاما به سمت یک حجم خاک گسیل شود، شدت پرتوهای گامایی که بعد از پراکندگی از خاک به آشکارساز می‌رسند برابر است با [۲۱]:

$$I = I_0 C_i V D_e \exp(-\mu x) \exp(-\mu' x') + m.c \quad (3-34)$$

که در آن I شدت پرتوهای رسیده به آشکارساز، V حجمی که در آن اندرکنش انجام می‌شود، C_i یک مقدار ثابت که به نوع آشکارساز، بازده آن و شرایط حاکم بر آزمایش مرتبط است، μ و μ' ضریب تضعیف خطی ماده در دو انرژی فرودی و خروجی، D_e چگالی الکترون‌ها در حجم V می‌باشد، جمله $m.c$ مربوط به پراکندگی‌های چندگانه است. اگر در رابطه (۳-۳۴) قرار دهیم:

$$x = x' = 0 \quad (3-35)$$

این شرط را به این دلیل اعمال می‌کنیم چون بیشترین پراکندگی پرتوهای گاما در ابتدای برخورد به سطح رخ می‌دهد. در این صورت جمله مربوط به پراکندگی‌های چند گانه حذف شده و رابطه به صورت زیر ساده می‌شود.

$$I = I_0 C_i V D_e \quad (36-3)$$

برای محاسبه D_e ، ابتدا باید چگالی الکترون‌ها در واحد حجم خاک خشک حساب شود [۲۱].

$$\rho_e = \frac{\rho}{u} \sum_i w_i \frac{Z_i}{A_i} \quad (37-3)$$

چگالی خاک خشک، w_i کسر وزنی عناصر موجود در خاک می‌باشد. معمولاً عناصر موجود در خاک جزء

عناصر سبک و متوسط هستند ($\text{Si}, \text{Al}, \text{O}, \text{H}, \text{Na}, \dots$) در تمام این عناصر، به جزء H ، رابطه $A_i = 2 Z_i$

برقرار است. که با جایگذاری داریم:

$$\rho_e = \frac{\rho}{u} \left(w_H \frac{Z_H}{A_H} + w_O \frac{Z_O}{A_O} + \dots + w_n \frac{Z_n}{A_n} \right) \quad (38-3)$$

همان طور که اشاره شد:

$$Z_H = A_H$$

$$2Z_O = A_O$$

.

.

.

$$2Z_n = A_n \quad (39-3)$$

که با قرار دادن مقادیر بالا در معادله (۳۸-۳) داریم:

$$\begin{aligned} \rho_e &= \frac{\rho}{u} \left(w_H \frac{Z_H}{Z_H} + w_O \frac{Z_O}{2Z_O} + \dots + w_n \frac{Z_n}{2Z_n} \right) \\ &= \frac{1}{2} \frac{\rho}{u} (w_H + (w_H + w_O + \dots + w_n)) \end{aligned} \quad (40-3)$$

می‌توان برای راحتی کار $w_1 = w_H$, $w_2 = w_O$, ... را در معادله قرار داد. از آنجا که کسر وزنی تمام عناصر در هر ترکیب نرمال به یک است.

$$w_H + w_O + \dots + w_n = w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \quad (41-3)$$

در نهایت معادله (3-40) به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\rho_e = \frac{1}{2} \frac{\rho}{u} (w_1 + 1) \quad (42-3)$$

اگر از مقدار w_1 (کسر وزنی H در خاک خشک) را ناچیز فرض کرده و از آن صرف نظر کنیم در این صورت داریم:

$$D_e = \frac{1}{2} \frac{\rho}{u} \quad (43-3)$$

حال اگر به خاک اولیه رطوبتی به اندازه U اضافه شود.

$$U = M_{water} / M_{wet} \quad (44-3)$$

این تعریف همان تعریف رطوبت جرمی است. قبلاً نیز بیان شد که افزایش آب معادل با افزایش کسر وزنی H و O و کاهش کسر وزنی سایر عناصر است. که کسر وزنی‌های جدید به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$w_1' = \frac{M'_H}{M'_{wet}}$$

$$w_2' = \frac{M'_O}{M'_{wet}}$$

.

.

.

$$w_n' = \frac{M'_n}{M'_{wet}} \quad (45-3)$$

که در روابط بالا M'_H , M'_O , ... و M'_n به ترتیب جرم H , O , ... و عنصر n در خاک بعد افزایش رطوبت است. جرم خاک بعد این افزایش رطوبت، مجموع جرم خاک اولیه و جرم آبی است که به خاک اضافه شده است.

$$M'_{wet} = M_{wet} + M_{water} \quad (46-3)$$

اگر طرفین رابطه را بر جرم خاک نهایی تقسیم کنیم داریم:

$$\frac{1}{M'_{wet}} \times (M'_{wet} = M_{wet} + M_{water})$$

$$\rightarrow 1 = \frac{M_{wet}}{M'_{wet}} + \frac{M_{water}}{M'_{wet}} \quad (47-3)$$

با جایگذاری مقدار رطوبت داریم:

$$\rightarrow 1 = \frac{M_{wet}}{M'_{wet}} + U$$

$$1 - U = \frac{M_{wet}}{M'_{wet}} \quad (48-3)$$

از آنجا که افزایش رطوبت در حجم ثابت اتفاق می‌افتد. می‌توان نسب چگالی قبل (ρ) و بعد افزایش رطوبت (ρ') را بدست آورد.

$$\frac{M_{wet}/V_{wet}}{M'_{wet}/V_{wet}} = 1 - U \rightarrow M_{wet}/V_{wet} = \rho, \quad M'_{wet}/V_{wet} = \rho' \rightarrow \frac{\rho}{\rho'} = 1 - U \quad (49-3)$$

می‌دانیم که:

$$M_{H\ water} = \frac{1}{9} M_{water}$$

$$M_{O\ water} = \frac{8}{9} M_{water} \quad (50-3)$$

جرم نهایی هیدروژن:

$$M_H' = M_H + M_{H\ water} \quad (51-3)$$

با استفاده از رابطه (50-3) داریم:

$$M_H' = M_H + \frac{1}{9} M_H \quad (52-3)$$

جرم اکسیژن را نیز به همین ترتیب بدست می‌آوریم:

$$M_O' = M_O + M_{O\ water} = M_O + \frac{8}{9} M_O \quad (53-3)$$

و سایر عناصر جرمشان ثابت می‌ماند.

$$, \dots, M_n' = M_n \quad (54-3)$$

در نهایت مجموعه روابط (۳-۴۵) با استفاده از روابط (۳-۵۲) تا (۳-۵۴) و (۳-۴۸) به صورت زیر در می‌آید.

$$w_1' = \frac{M_H}{M'_{wet}} + \frac{1}{9} \frac{M_{water}}{M'_{wet}} = \frac{M_H}{M_{wet}/(1-U)} + \frac{1}{9} \frac{M_{water}}{M'_{wet}} = (1-U)w_1 + \frac{1}{9}U$$

$$w_2' = \frac{M_O}{M'_{wet}} + \frac{8}{9} \frac{M_{water}}{M'_{wet}} = \frac{M_O}{M_{wet}/(1-U)} + \frac{8}{9} \frac{M_{water}}{M'_{wet}} = (1-U)w_2 + \frac{8}{9}U$$

.

.

.

$$w_n' = \frac{M'_n}{M'_{wet}} = \frac{M_n}{M_{wet}/(1-U)} = w_n(1-U) \quad (55-3)$$

همان‌طور که ملاحظه شد مجموعه روابط (۳-۵۵) به صورت زیر ساده می‌شود.

$$w_1' = (1-U)w_1 + \frac{1}{9}U \quad \text{کسر وزنی H بعد اضافه کردن رطوبت}$$

$$w_2' = (1-U)w_2 + \frac{8}{9}U \quad \text{کسر وزنی O بعد افزایش رطوبت} \quad (56-3)$$

و در نهایت کسر وزنی برای عنصر nام به صورت

$$w_n' = (1-U)w_n \quad (57-3)$$

است. چگالی الکترون‌های بعد از افزایش رطوبت به خاک:

$$\rho_e' = \frac{\rho'}{u} \sum_i w_i' \frac{Z_i}{A_i} \quad (58-3)$$

ρ' چگالی نهایی خاک، w_i' کسر وزنی جدید عناصر است. با استفاده از روابط (۳-۵۶) و (۳-۵۸) در رابطه

$$\rho_e' = \frac{\rho'}{u} (w_1' \frac{Z_1}{A_1} + w_2' \frac{Z_2}{A_2} + \dots + w_n' \frac{Z_n}{A_n}) \quad \text{بالا داریم:}$$

$$\rightarrow = \frac{1}{1-U} \frac{\rho'}{u} ((1-U)w_1 \frac{1}{1} + \frac{1}{9}U \frac{1}{1} + (1-U)$$

$$w_2 \frac{1}{2} + \frac{8}{9}U \frac{1}{2} + \dots + (1-U)w_n) \frac{1}{2}$$

$$\rightarrow = \frac{\rho'}{u} (\frac{1}{2}(w_1 + (w_1 + w_2 + \dots + w_n))) + \frac{10}{181-U}U \quad (59-3)$$

و در نهایت رابطه به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\rho_e' = \left(\frac{1}{2} (w_1 + 1) + \frac{U}{1-U} \frac{10}{18} \right) \frac{\rho}{u} \quad (۶۰-۳)$$

معمولاً از کسر وزنی هیدروژن (w_1) در خاک خشک صرف نظر می‌شود. در این قسمت کنتراست را به صورت اختلاف نسبی شدت پرتوهای گاما بعد و قبل از پراکندگی از ماده تعریف می‌کنیم.

$$C = \frac{I_2 - I_1}{I_1} = \frac{D_e'}{D_e} - 1 \quad (۶۱-۳)$$

که در آن I_1 و I_2 به ترتیب شدت پرتوهای پس پراکنده شده و پرتوهای فرودی هستند. با قرار دادن مقادیر چگالی الکترون‌ها بعد و قبل از افزایش رطوبت برای کنتراست داریم.

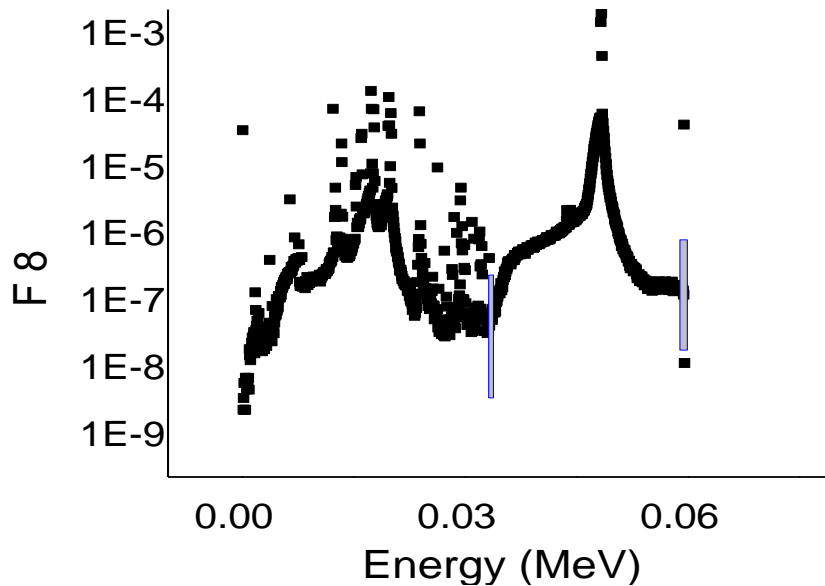
$$C = \frac{\frac{\rho}{u} \left(0.5 + \frac{U}{1-U} \frac{10}{18} \right)}{0.5 \frac{\rho}{u}} - 1 = 1.1111 \frac{U}{1-U} \quad (۶۲-۳)$$

از آنجا که می‌توان در رطوبت‌های پایین (زیر بیست درصد) از U در مقابل 1 مخرج کسر معادله (۶۲-۳) صرف نظر کرد، و رابطه به صورت زیر ساده می‌شود.

$$C = 1.1111 U \quad (۶۳-۳)$$

۳-۳-۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی مانند قسمت قبل از خاک تجربی که عناصر آن در جدول ۳-۱ آمده با ابعاد 3 cm $50 \times 70 \times 50$ چشمه ^{241}Am (جدول ۳-۹) و آشکارساز CsI(Tl) با ابعاد $1 \times 2 \text{ in}$ استفاده شده برای گرفتن طیف پرتوهای پس پراکنده چشمه را روی آشکارساز و بالای سطح خاک قرار می‌دهیم. بعد از شبیه‌سازی این سیستم با کد MCNP-4C و اجرای کد در رطوبت‌های مختلف، F8 (خروجی کد) برحسب انرژی رسم می‌شود (شکل ۳-۱۳). طبق رابطه (۳-۲۹) انرژی پرتوهای یک بار پراکنده شده در زاویه 180° برابر با 0.0484 MeV است (انرژی پرتوهای گسیل شده از چشمه ^{241}Am برابر با 0.059537 MeV است) و باید تالی F8 در این انرژی قله داشته باشد (شکل ۳-۱۳) که به این قله، قله پراکندگی یگانه گویند.



شکل ۳-۱۳ نمودار F8 برحسب انرژی در رطوبت 2.568% را نشان می‌دهد که در آن ناحیه‌ی مربوط به قله پراکندگی یگانه مشخص شده است و اندازه هر بازه انرژی 0.00007 MeV می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود نمودار مربوط به تالی F8 در انرژی 0.04845 MeV قله دارد که ناشی از جذب پرتوهای یک بار پراکنده شده در آشکارساز است و قله فوتوپیک نیز در انرژی MeV 0.059537 وجود دارد. مساحت سطح زیر قله فوتوپیک را در بازه 0.03409 - 0.05943 MeV و خطای آن را با استفاده از یک برنامه فرترن محاسبه می‌کنیم. مساحت این بازه به صورت:

$$S = \sum_i F8_i d E_i \quad (۶۴-۳)$$

که S مساحت زیر پیک پراکندگی یگانه، F8_i مقدار تالی در هر بازه انرژی و dE_i طول هر بازه انرژی (که مقداری ثابت برای هر بازه و برابر با 0.00007 MeV) است. خطای نسبی F8 در هر بازه باعث خطا در مقدار انتگرال مورد نظر می‌شود که به صورت زیر بدست می‌آید (مجموع مربعات).

$$\sigma_s = \left(\sum_i \left(\frac{dF8_i}{F8_i} d E_i \right)^2 \right)^{0.5} \quad (۶۵-۳)$$

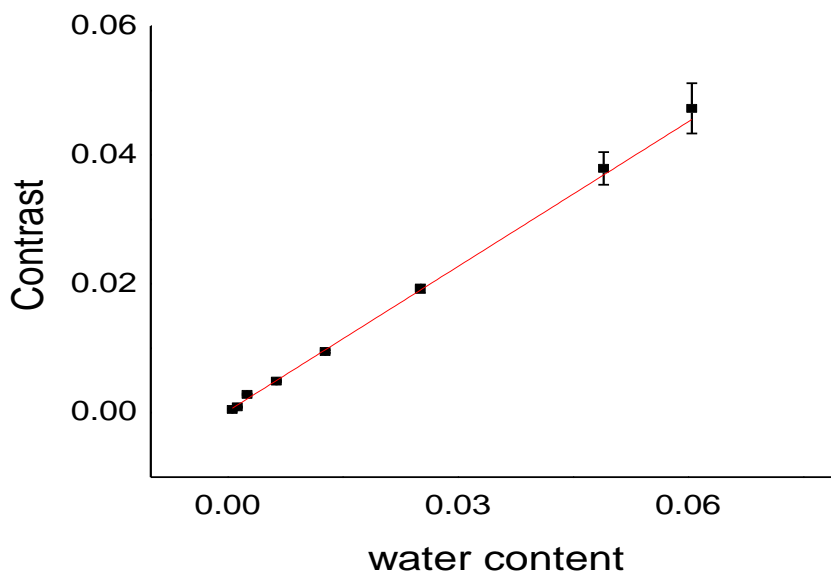
dF_{8_i} خطای مطلق مربوط به تالی F8 در هر بازه است و خطایی که توسط شبیه سازی مونت کارلو برای هر بازه بدست می آید خطای نسبی و برابر است با:

$$\sigma_{F_{8_i}} = \frac{dF_{8_i}}{F_{8_i}} \quad (3-66)$$

با داشتن مساحت و خطای آن در رطوبت‌های مختلف، کنتراست را نسبت به حالت خشک بدست می‌آوریم که نتایج آن در جدول ۳-۲۰ آورده شده است. نمودار کنتراست بر حسب انرژی، نموداری صعودی با شیب برابر با 0.75 ± 0.04 است (شکل ۳-۱۴).

جدول ۳-۲۰ مقادیر بدست آمده برای C همراه با خطای آن در رطوبت‌های مختلف

خطای C	مقدار C	رطوبت خاک	ردیف
1.060×10^{-4}	4.9878×10^{-4}	6.436×10^{-4}	1
1.064×10^{-4}	8.6843×10^{-4}	0.00129	2
1.067×10^{-4}	0.00283	0.00257	3
1.119×10^{-4}	0.00489	0.00637	4
1.952×10^{-4}	0.00949	0.01271	5
6.547×10^{-4}	0.01925	0.02510	6
0.00252	0.0379	0.04897	7
0.00389	0.04723	0.06040	8



شکل ۳-۱۴ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک، وقتی کنتراست توسط انتگرال گیری از خود نمودار، خطی راست با شیب 0.75 ± 0.04

خطای کنتراست اولاً ناشی از خطای مساحت قله مورد نظر و ثانیاً ناشی از تقریب معادله (۳-۶۳) است. این خطا نیز توسط یک برنامه فرترن محاسبه شده و همان طور که ملاحظه شد نتایج در جدول ۳-۲۰ آورده شده است.

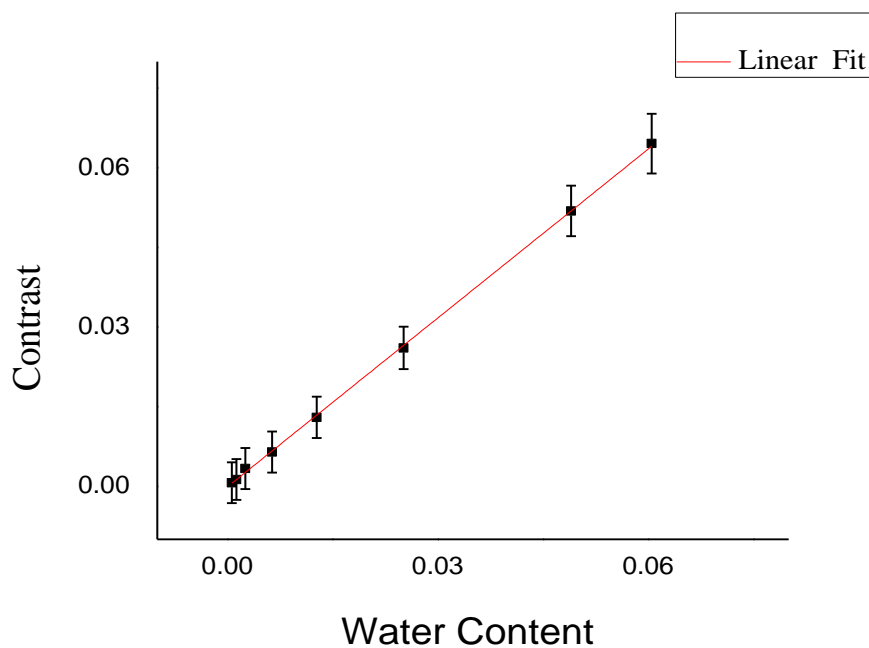
حال اگر به جای انتگرال گیری در بازه مورد نظر روی نمودار یک برازش گائوسی انجام دهیم در این صورت تابع مربوط به این برازش به صورت تابع زیر است.

$$f(x) = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} \exp\left(-2\left(\frac{x - x_c}{w}\right)^2\right) \quad (۳-۶۷)$$

x_c و A ، w ، y_0 مقادیر ثابتی هستند که توسط نرم افزار Origin مشخص می شود. در اینجا $f(x)$ تالی F8 بر حسب انرژی است. مساحت سطح زیر نمودار برازش شده و خطای آن را بدست آورده و از روی آن کنتراست و خطای آن محاسبه می شود (جدول ۳-۲۱). نمودار کنتراست بر حسب رطوبت در شکل ۳-۱۵ آورده شده است.

جدول ۳-۲۱ مقادیر بدست آمده برای C از روی نمودار برازش شده همراه با خطای آن در رطوبت‌های مختلف

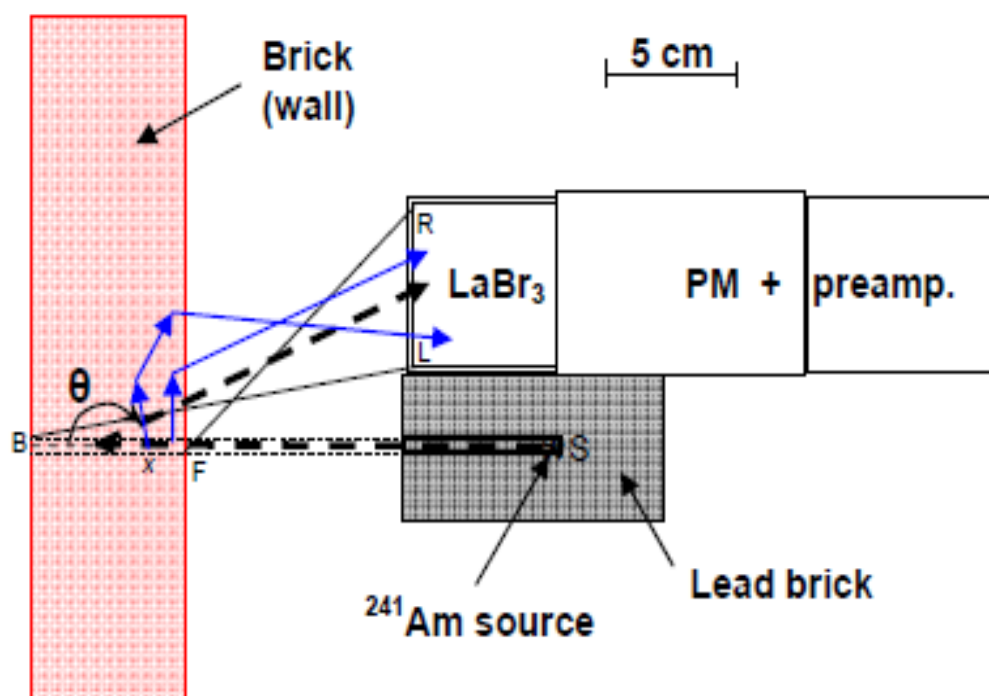
ردیف	رطوبت خاک	مقدار C	خطای C
1	6.436×10^{-4}	6.63168×10^{-4}	0.0038502
2	0.00129	0.00126	0.003851
3	0.00257	0.00334	0.003859
4	0.00637	0.00643	0.003869
5	0.01271	0.01297	0.003895
6	0.02510	0.02606	0.003989
7	0.04897	0.05187	0.004748
8	0.06040	0.06456	0.005629



شکل ۳-۱۵ نمودار تغییرات C (کنتراست از روی مساحت نمودار برازش شده در ناحیه مورد نظر بدست می‌آید) بر حسب رطوبت خاک خطی راست با شیب 1.0608 ± 0.07 .

که شیب آن برابر با 1.0608 ± 0.07 است.

در کار D. BUCURESCU and I. BUCURESCU, 2011 برای اندازه‌گیری رطوبت آجر، سیستم مورد نظر یک چشمه نقطه‌ای در نظر گرفته شده است (شکل ۳-۱۵) که موازی‌ساز آن مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 5$ cm و چشمه داخل حفره‌ای به قطر 5 mm و طول 60 mm قرار دارد و شیب نمودار کنتراست برحسب انرژی وقتی با دو روش بالا رسم می‌شود به ترتیب برابر با 0.78 ± 0.003 و 1.01 ± 0.006 می‌شود [۲۱].

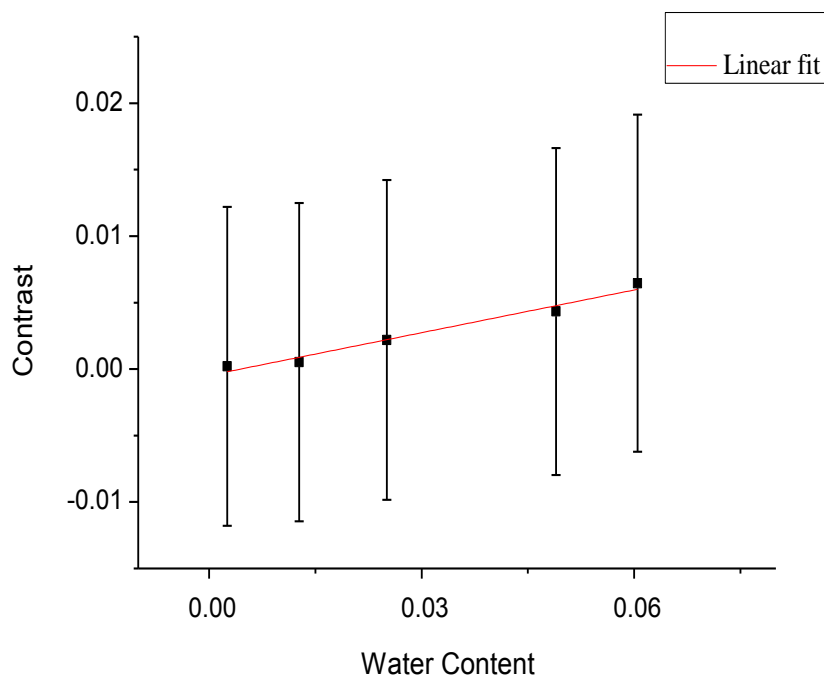


شکل ۳-۱۶ سیستم در نظر گرفته شده برای اندازه‌گیری رطوبت آجر، که چشمه ^{241}Am کنار آشکارساز و داخل یک موازی‌ساز قرار دارد
 ما در ادامه کار چشمه واقعی را به کار برده و تنها با یک حفاظ به ضخامت 0.2 cm برای چشمه شیب خوبی را برای نمودار کنتراست برحسب رطوبت بدست می‌آوریم.

۳-۳-۴ چشمه واقعی

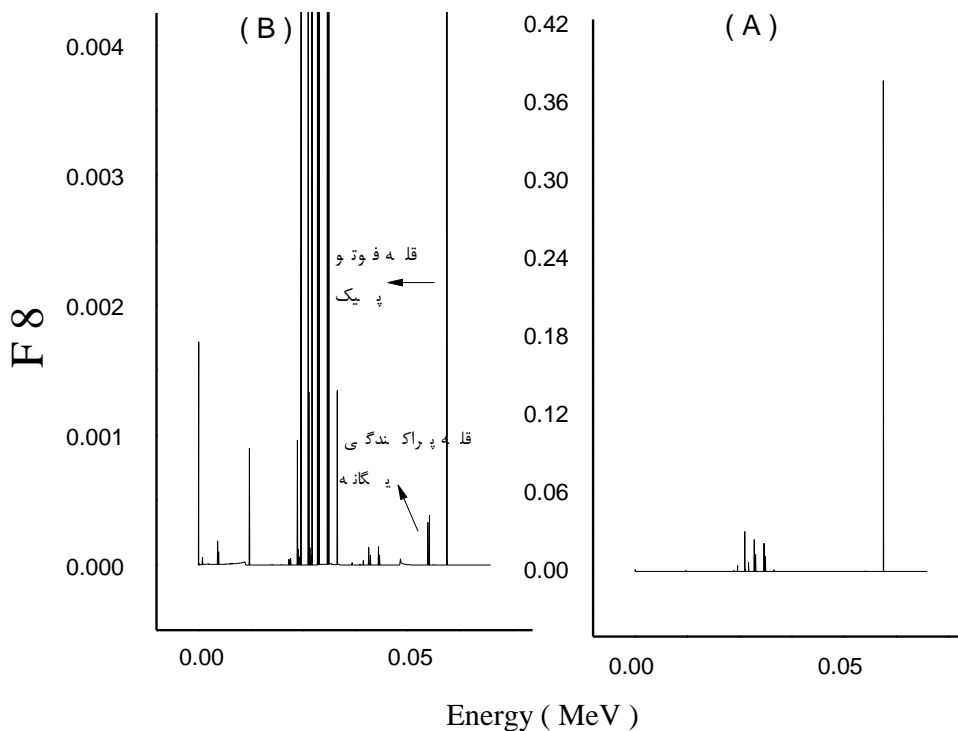
از آن‌جا که چشمه‌های موجود در آزمایشگاه استوانه‌ای همسانگرد هستند، باید در شبیه‌سازی چشمه همسانگرد را به جای چشمه موازی جایگزین کرد که این کار، گام به گام انجام می‌شود. در گام اول

چشمه را مسطح همسانگرد می‌گیریم. بعد از ثبت F8، ملاحظه شد که خطای آماری مربوط به آن با وجود زمان زیاد اجرای برنامه، آن قدر بالا است که به طور حتم تغییرات کنتراست در رطوبت‌های مختلف ناچیز است. بعد از رسم نمودار کنتراست بر حسب رطوبت نموداری صعودی با شیب 0.1 بدست آمد یعنی همان طور که حدس زده شد با افزایش رطوبت کنتراست چندان تغییر نمی‌کند (شکل ۳-۱۲).



شکل ۳-۱۷ نمودار تغییرات C (کنتراست از روی مساحت نمودار برازش شده در ناحیه مورد نظر بدست می‌آید) بر حسب رطوبت خاک

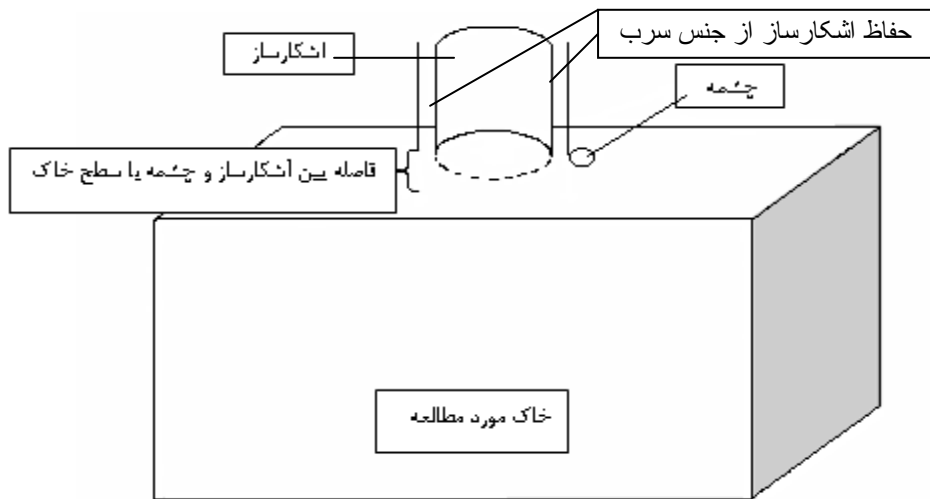
بعد از ثبت F8 با وجود زیاد بودن زمان اجرای برنامه خطای F8 روی اکثر بازه‌ها زیاد است و این باعث می‌شود که تغییرات کنتراست در رطوبت‌های مختلف چندان مشهود نباشد بعلاوه وقتی چشمه همسانگرد به کار برده می‌شود قله مربوط به پیک پراکندگی یگانه در مقابل قله فوتوپیک در انرژی 0.059537 MeV خیلی کوچک است (شکل ۳-۱۸) این نیز به نوبه خود باعث می‌شود تغییرات سطح زیر نمودار (نموداری که به صورت گائوسی برازش شده) مربوط به قله پراکندگی یگانه در رطوبت‌های مختلف زیاد نباشد.



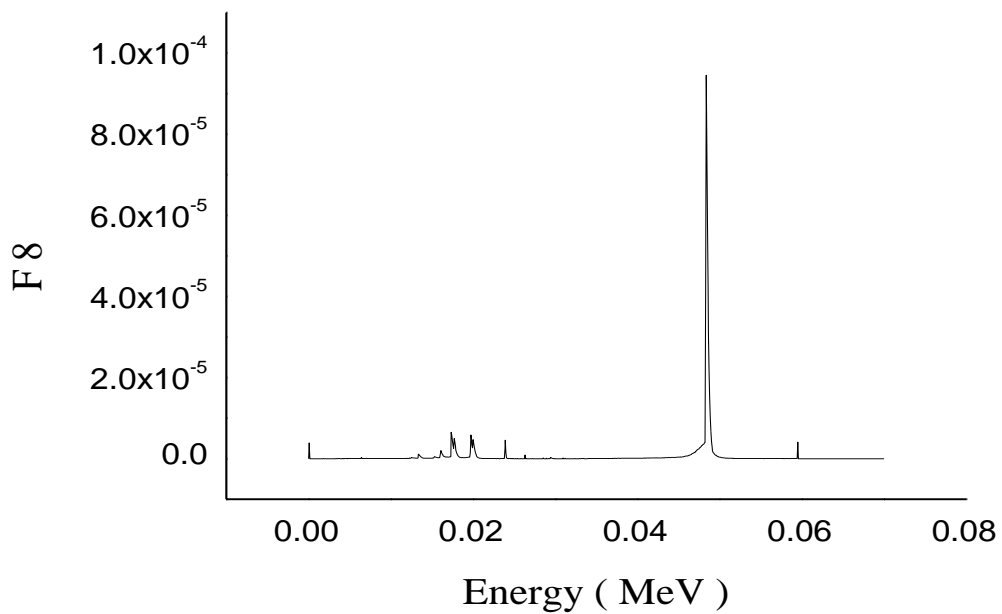
شکل ۳-۱۸ تالی F8 بر حسب انرژی، در نمودار (A) قله پس پراکندگی دیده نمی‌شود و نمودار (B) بازه F8 را کم کرده تا قله پراکندگی یگانه دیده شود.

برای این که تغییرات مساحت زیر این قله در رطوبت‌های مختلف قابل رویت شود باید کاری کرد که سطح قله فوتوپیک در مقابل این قله پایین بیاید. چشمه را کنار آشکارساز قرار داده (شکل ۳-۱۹) و از آنجا که آشکارساز داخل حفاظ سربی قرار دارد احتمال شمارش پرتوهای پراکنده نشده پایین آمده و سطح قله فوتوپیک (0.059537 MeV) نسبت به قله پراکندگی یگانه (0.04845 MeV) کمتر می‌شود (شکل ۳-۲۰). در این صورت شیب نمودار کنتراست بر حسب رطوبت برابر با 0.75 ± 0.1 است (شکل ۳-۲۱).

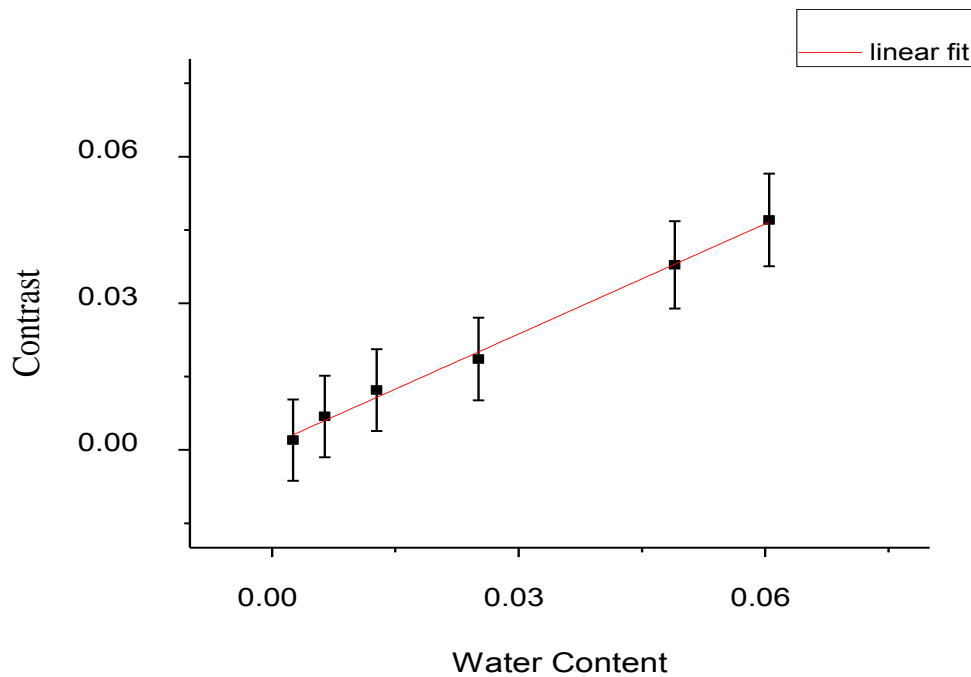
(۲۱).



شکل ۳-۱۹ سامانه شبیه‌سازی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی پرتوهای پراکنده شده از سطح خاک، محیط خلاء و چشمه کنار آشکارساز



شکل ۳-۲۰ تالی F8 بر حسب انرژی، همان‌طور که ملاحظه می‌شود سطح قله فتوپیک خیلی پایین آمده است.



شکل ۳-۲۱ نمودار تغییرات C (کنتراست از روی مساحت نمودار برازش شده در ناحیه مورد نظر بدست می‌آید) بر حسب رطوبت خاک

سه حالت را در نظر می‌گیریم.

۱- تعریف حفاظ برای چشمه

۲- در نظر گرفتن چشمه موازی

۳- در نظر گرفتن چشمه موازی حجمی به شکل استوانه

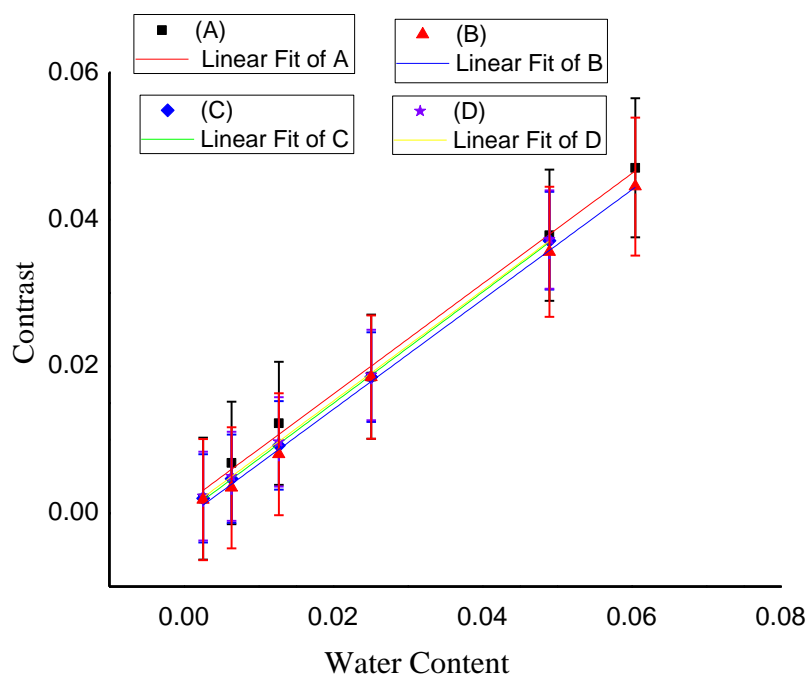
بعد از رسم نمودار کنتراست بر حسب رطوبت برای این سه حالت همان‌طور که در شکل ۳-۲۲ ملاحظه

می‌شود نتایج بدست آمده مثل حالت قبل است و شیب این نمودار برای این سه حالت به صورت زیر است.

۱- 0.74 ± 0.16

۲- 0.75 ± 0.17

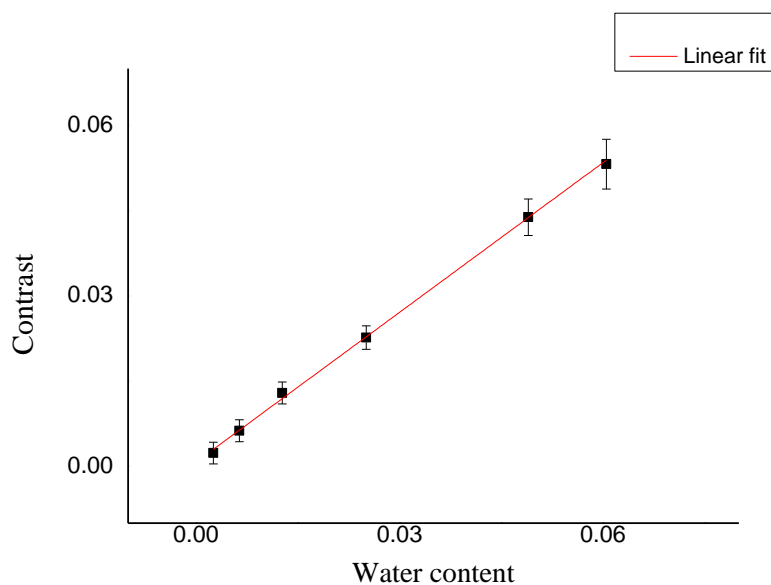
۳- 0.75 ± 0.17



شکل ۳-۲۲ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک برای چهار حالت A- چشمه همسانگرد مسطح B- چشمه همسانگرد مسطح داخلی حفاظ C- چشمه موازی D- چشمه موازی به صورت یک استوانه

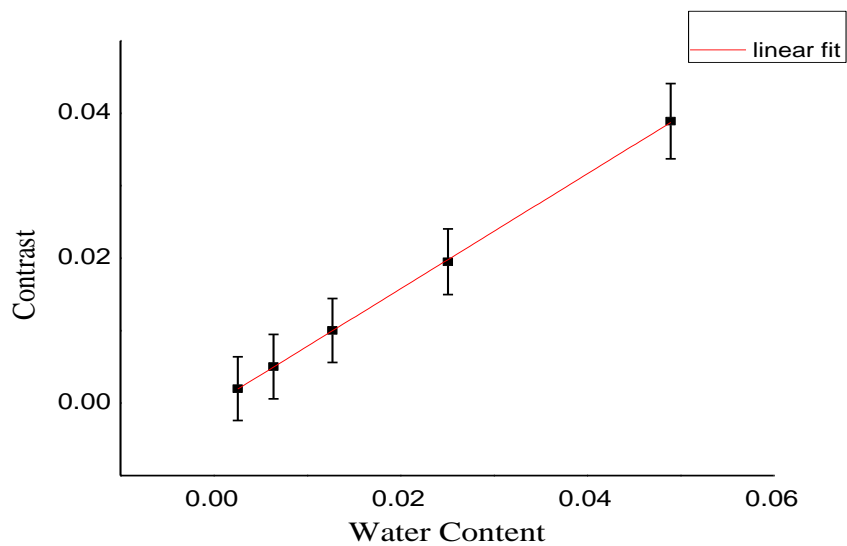
ملاحظه شد که اگر چشمه کنار آشکارساز باشد حتی اگر چشمه موازی را در شبیه‌سازی به کار بریم شیب نمودار از 0.75 تجاوز نمی‌کند (هر چه شیب نمودار بیشتر قدرت تفکیک رطوبت‌های مختلف بیشتر است).

در ادامه چشمه را روی محور آشکارساز قرار داده و برای به حداقل رساندن ورود پرتوهای پراکنده نشده به آشکارساز برای چشمه یک حفاظ تعریف می‌کنیم. چشمه نزدیک سطح خاک و آشکارساز در فاصله 5 cm از سطح آن قرار دارد بعد محاسبه کنتراست و رسم نمودار آن بر حسب رطوبت شیب این نمودار برابر با 0.87 ± 0.05 است (شکل ۳-۲۳).



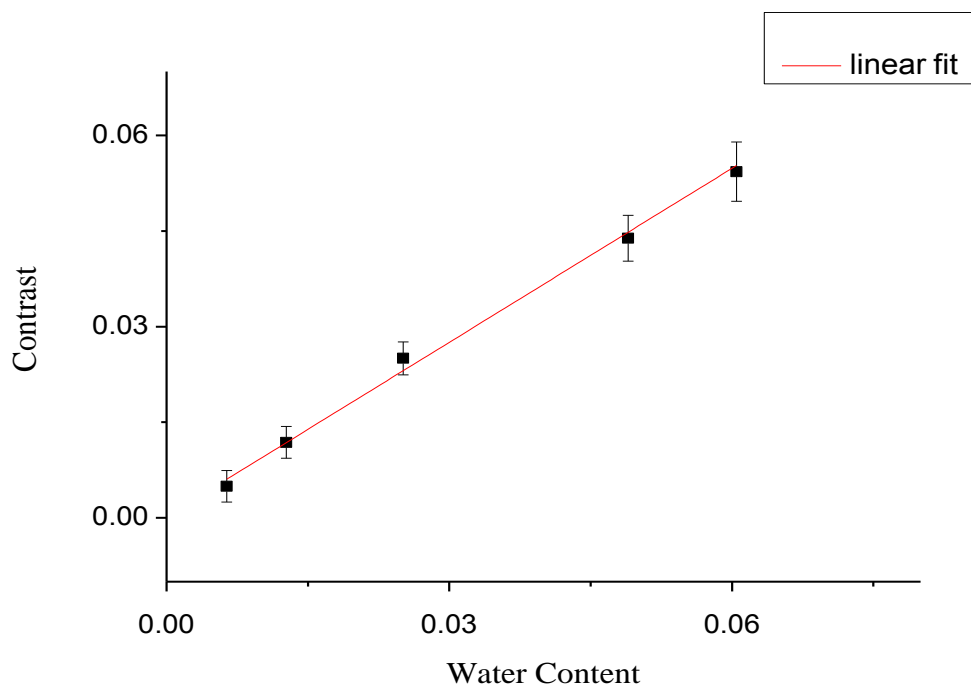
شکل ۳-۲۳ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک وقتی آشکارساز در فاصله 5 cm و چشمه در فاصله 0.6 cm از سطح خاک قرار دارند.

اگر ضخامت حفاظ اطراف چشمه افزایش یابد به علت افزایش پراکندگی پرتوهای گاما داخل این حفاظ و شمارش آن‌ها توسط آشکارساز شیب نمودار کاهش یافته و برابر با 0.79 ± 0.15 است (شکل ۳-۲۴).



شکل ۳-۲۴ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک برای وقتی که ضخامت حفاظ چشمه زیاد شود.

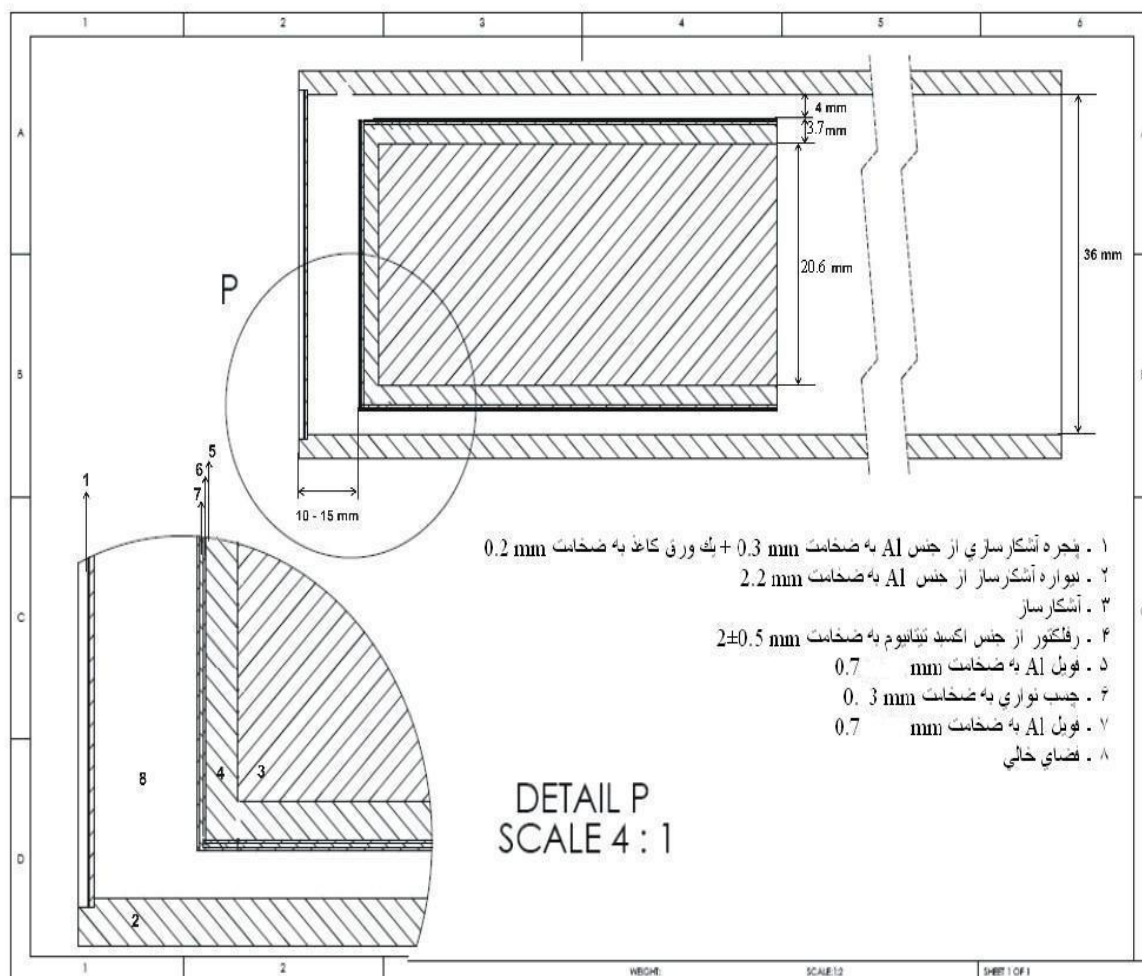
اگر آشکارساز را پایین آورده و به طوری که چشمه روی پنجره آشکارساز و در فاصله 0.6 cm از سطح خاک قرار گیرد در این صورت شیب نمودار برابر با 0.90 ± 0.07 است (شکل ۳-۲۵).



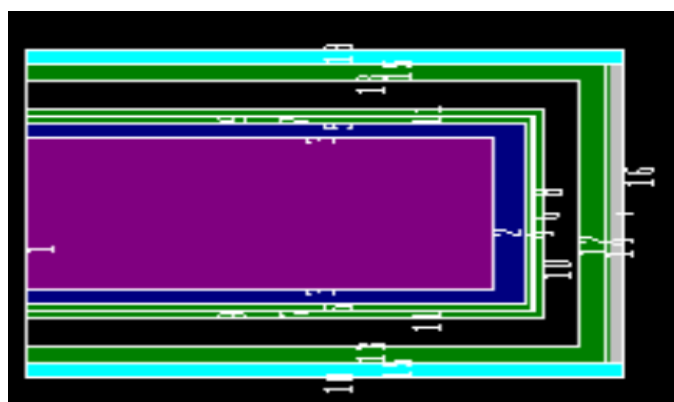
شکل ۳-۲۵ نمودار کنتراست بر حسب رطوبت وقتی فاصله آشکارساز از سطح خاک 0.6 cm و چشمه در مرکز پنجره آشکارساز قرار دارد با شیب 0.90 ± 0.07

۳-۳-۵ آشکارساز واقعی

تا به اینجای کار در شبیه‌سازی‌ها تنها از بلور آشکارساز استفاده می‌کردیم اما در آشکارساز واقعی استوانه-ای شکل که از چندین سلول با جنس‌های مختلف تشکیل شده است. شکل ۳-۲۶ برشی عمودی از آشکارساز واقعی با تمام جزئیات و شکل ۳-۲۷ برشی عمودی از آن را که توسط کد MCNP-4C شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد.

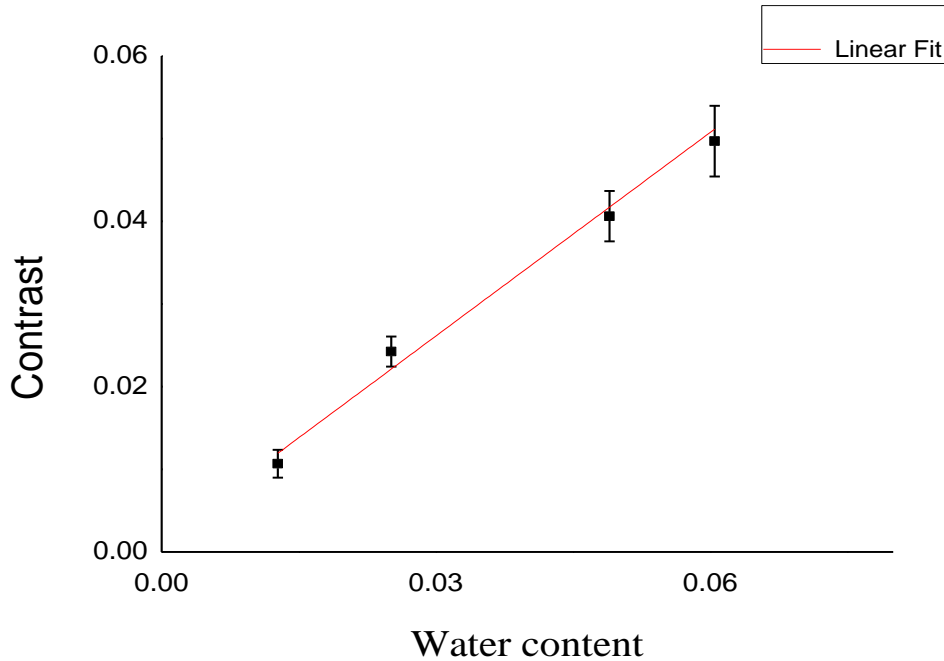


شکل ۳-۲۶ برشی عمودی از آشکارساز واقعی با تمام جزئیات



شکل ۳-۲۷ طرحی از آشکارساز شبیه‌سازی شده و هر لایه با یک رنگ متفاوت مشخص شده است و بلور آشکارساز در مرکز قرار دارد و شماره‌های که روی آن قرار دارد شماره سلول‌های است که توسط کد به هر سلول نسبت داده شده است.

با به کارگیری آشکارساز واقعی در شبیه‌سازی و به دست آوردن کنتراست در رطوبت‌های مختلف، نمودار کنتراست بر حسب رطوبت این بار نیز صعودی با شیب 0.82 ± 0.07 است (شکل ۳-۲۸).



شکل ۳-۲۸ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک بعد از شبیه‌سازی آشکارساز واقعی در فایل وردی با شیب 0.82 ± 0.07

آشکارساز جدید طوری طراحی شده است فاصله بلور آشکارساز از سطح خاک به علت وجود لایه‌های جلوی، از سطح خاک 2.04 cm است و این باعث کم شدن شیب نمودار می‌شود. وجود این لایه‌ها باعث پراکندگی بیشتر پرتوهای گاما و در نتیجه افزایش مقدار I_1 و I_2 در معادله (۳-۶۱) شده این افزایش در صورت به علت کم شدن I_1 از I_2 زیاد محسوس نیست و در مخرج، خود را نشان می‌دهد و باعث کاهش کنتراست و در نتیجه کاهش مقدار شیب نمودار کنتراست بر حسب رطوبت می‌شود. باید توجه داشت که میزان تضعیف و پراکندگی پرتوها هر دو افزایش می‌یابد اما افزایش پراکندگی غالب است.

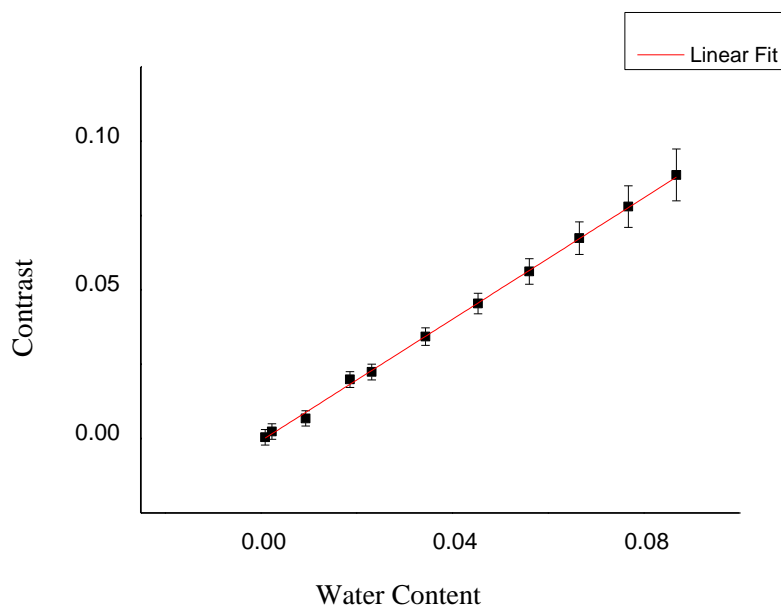
۳-۳-۶ خاک جدید

تا به این جای کار، تمام شبیه‌سازی‌ها برای خاکی با مشخصات داده شده در جدول ۳-۱ و ۳-۲ انجام گرفت [۱۵] ولی مشخصات خاکی که برای کار تجربی در این پژوهش استفاده شد در جدول ۳-۲۲ آمده است.^۱ چگالی خاک جدید برابر با 1.346 g.cm^{-3} است. شبیه‌سازی را با این خاک انجام داده و نمودار مورد نظر را برای آن رسم کرده این نمودار شبیهی برابر با 0.85 ± 0.03 دارد (شکل ۳-۲۹).

جدول ۳-۲۲ کسر وزنی‌های خاک جدید

عناصر	کسر وزنی
O	0.56023
Na	0.002959
Mg	0.026432
Al	0.062938
Si	0.201572
P	0.000793
S	0.001267
K	0.021561
Ca	0.123517
Ti	0.002351
Fe	0.024227
Mn	0.000454
Sr	0.000465
Zr	0.000236

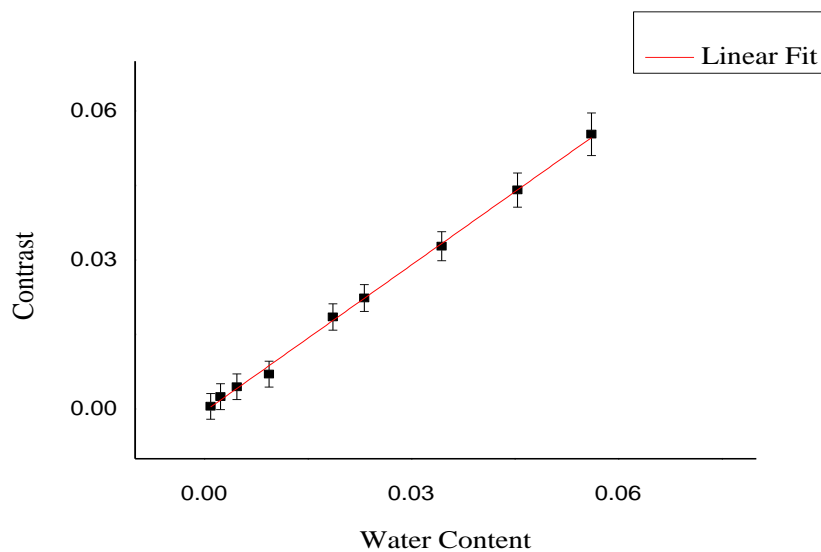
^۱ این داده نتایج تجزیه خاک مورد نظر در آزمایشگاه XRF دانشگاه صنعتی شاهرود است که توسط آقای مهندس کبیریان گزارش شده، دقت داده‌ها 10^{-6} می‌باشد



شکل ۳-۲۹ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت برای خاک جدید با شیب 0.85 ± 0.03

۷-۳-۳ بررسی اثر هوا

در تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده فرض شد که محیط خلاء باشد حال اگر در شبیه‌سازی سامانه مورد نظر را در محیطی که هوا وجود دارد شبیه‌سازی کنیم و کنتراست را بدست آوریم نمودار کنتراست بر حسب رطوبت باز هم نموداری صعودی و با شیب 0.98 ± 0.06 داریم (شکل ۳-۳۰).



شکل ۳-۳۰ نمودار تغییرات C بر حسب رطوبت خاک جدید وقتی اثر هوا را در نظر بگیریم با شیب 0.98 ± 0.06

وجود هوا باعث افزایش تضعیف و پراکندگی پرتوهای گاما می‌شود و این به علت عبور دو بار پرتوهای گاما از آن هستند. اما به علت چگالی کم هوا میزان تضعیف غالب‌تر است و مقادیر I_1 و I_2 کاهش یافته و چون در صورت کسر رابطه (۳-۶۱) I_1 از I_2 کم می‌شود این کاهش در مخرج کسر محسوس‌تر از صورت آن بوده و باعث افزایش شیب نمودار کنتراست بر حسب رطوبت می‌شود.



فصل چهارم

کار آزمایشگاهی

۱-۴ اندازه‌گیری رطوبت به روش تضعیف

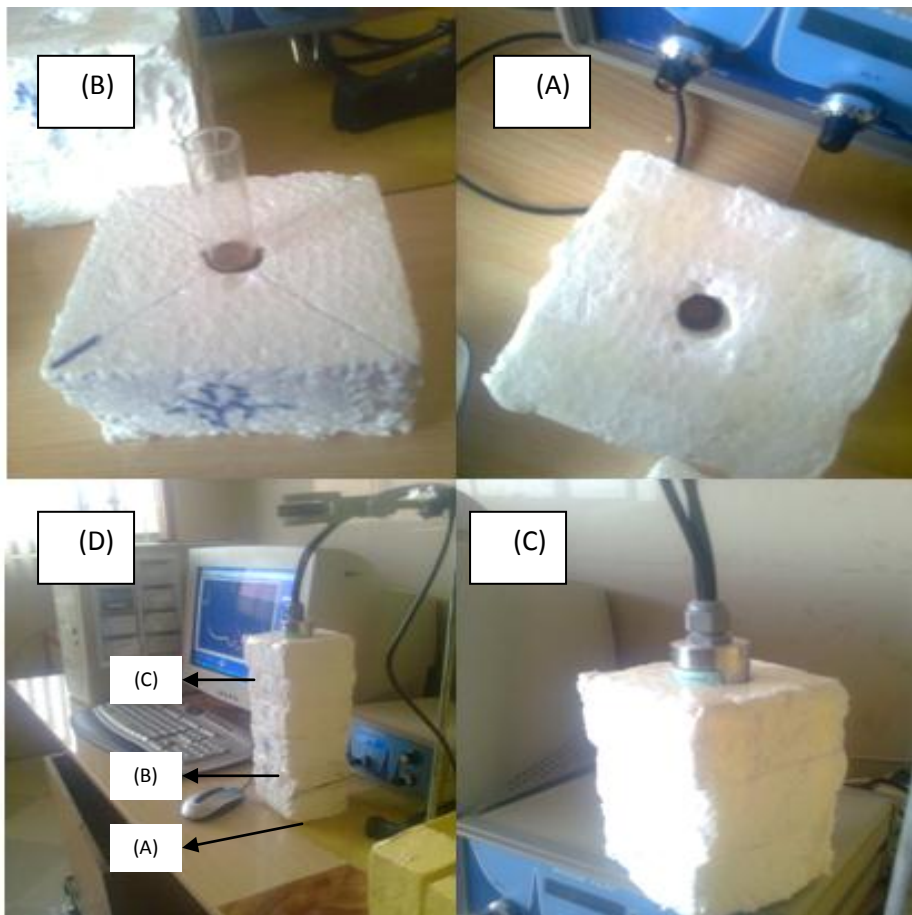
در فصل قبل با استفاده از شبیه‌سازی رطوبت خاک از مقادیر کم تا مقادیر زیاد محاسبه شد. در این فصل به اندازه‌گیری رطوبت می‌پردازیم.

از آشکارساز CsI(Tl) با ابعاد 1×1 in، چشمه ^{60}Co و یک لوله آزمایش از جنس شیشه با طول 10 cm و قطر داخلی و خارجی 1.344 cm و 1.6 cm برای ریختن خاک مورد مطالعه داخل آن، استفاده شد در ابتدا سامانه مورد نظر به صورت شکل ۱-۴ طراحی شد.



شکل ۱-۴ سامانه طراحی شده برای اندازه‌گیری رطوبت وقتی لوله آزمایش خالی است

اما چون احتمال ثابت نبودن موقعیت لوله آزمایش وجود داشت. کل سامانه داخل یک نگهدارنده از جنس یونولیت قرار گرفت (شکل ۲-۴). نگهدارنده مربوط به لوله آزمایش را روی نگهدارنده چشمه قرار داده و لوله آزمایش را تا جایی که امکان دارد به چشمه نزدیک می‌کنیم، طوری که روی هم قرار گیرند و در نهایت نگهدارنده مربوط به آشکارساز را روی آن‌ها قرار می‌دهیم (شکل ۲-۴ قسمت D). از آنجا که مساحت سطح قله فوتوپیک برای ما مهم است پراکندگی ناشی از نگهدارنده لحاظ نمی‌شود.



شکل ۲-۴ سامانه طراحی شده برای اندازه‌گیری رطوبت (A) حفاظی که چشمه‌ها داخل آن قرار دارند (B) حفاظ مربوط به لوله آزمایش (C) حفاظ مربوط به آشکارساز که در کل آزمایش ثابت است (D) کل سامانه داخل حفاظ و ترتیب قرار گرفتن سه قسمت روی هم.

بعد طراحی سامانه، ابتدا طیف مربوط به شیشه‌ی خالی و در مراحل بعد طیف مربوط به خاک را در رطوبت‌های مختلف (جدول ۱-۴) ثبت می‌کنیم. گام افزایش رطوبت برابر با $\Delta\theta_m = 0.02$ و رطوبت (θ_m) نیز به صورت نسبت آب اضافه شده به جرم خاک قبل از اضافه شدن آب تعریف شد (رابطه ۳-۲۱) که در جدول ۱-۴ مقادیر آن به رطوبت حجمی (θ_v) تبدیل شده است. رابطه بین شماره کانال و انرژی بعد از کالیبره کردن سیستم توسط دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs به صورت زیر در آمد.

$$E = -5.9583 + 2.0242 \times ch \quad (1-4)$$

با استفاده از یک برنامه فرترن شماره کانال به انرژی تبدیل شده و طیف مربوط به حالتی که لوله آزمایش خالی است از طیف مربوط به رطوبت‌های مختلف توسط همین برنامه کم می‌شود. روی قله فوتوپیک در انرژی 1.173 MeV برازش گائوسی توسط نرم‌افزار Origin انجام داده و انتگرال این نمودار در بازه 1214.616-1052.1682 keV گرفته می‌شود. نتایج حاصل در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱ مساحت مربوط به قله فوتوپیک در رطوبت‌های مختلف

خطای محاسبه انتگرال	مساحت زیر قله فوتوپیک	خطای محاسبه رطوبت حجمی	θ_v	θ_m
460.1205	60984.1399	0	0	0
2860.676	75708.0225	0.00168	0.02643	0.01
1134.383	76314.3389	0.00918	0.07928	0.03
633.6214	72149.8191	0.00188	0.13213	0.05
3731.912	75041.0590	0.00207	0.18499	0.07

اگر چشمه همسانگرد داشته باشیم پرتوهای گاما به صورت زیر تضعیف می‌شوند.

$$I = B \frac{A}{4\pi r^2} I_0 \exp[-(\mu'_s \rho'_s + \theta_v \mu_w + \theta_a \mu_a)x] \quad (۲-۴)$$

این رابطه همان رابطه ۳-۱۷ ولی برای یک چشمه همسانگرد است که در آن I و I₀ شدت پرتوها قبل و بعد از عبور از ماده، A مساحت پنجره آشکارساز، B ضریب انباشت و r فاصله چشمه از آشکارساز هستند. ضریب انباشت ضریب اصلاحی است و در رطوبت‌های مختلف نیز مقدار آن تغییر می‌کند. حال اگر رابطه ۴-۲ را برای دو رطوبت متفاوت بنویسیم و بر هم تقسیم کنیم در این صورت با توجه به این که مقادیر A، I₀، r، ρ_s'، μ_s'، θ_a و μ_a در تمام رطوبت‌ها ثابت هستند داریم:

$$I_1 = B_1 \frac{A}{4\pi r^2} I_0 \exp[-(\mu'_s \rho'_s + \theta_{1v} \mu_w + \theta_a \mu_a)x]$$

$$I_2 = B_2 \frac{A}{4\pi r^2} I_0 \exp[-(\mu'_s \rho'_s + \theta_{2v} \mu_w + \theta_a \mu_a)x]$$

$$I_2 = \frac{B_2}{B_1} I_1 \exp[-(\theta_{2v} \mu_w - \theta_{1v} \mu_w)x] = B' I_1 \exp(-\mu_w \Delta\theta_v x) \quad (۳-۴)$$

که $x = 4.8 \text{ cm}$ و $\mu_w = 0.0666 \text{ cm}^{-1}$ در تمام رطوبت‌ها ثابت‌اند. ضریب انباشت به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$B = \frac{I_{tot}}{I_u} \quad (4-4)$$

که I_{tot} شدت پرتوهای گامای رسیده به آشکارساز زمانی که چشمه همسانگرد در نظر گرفته می‌شود و I_u شدت پرتوهای رسیده به آشکارساز زمانی که برای چشمه یک موازی‌ساز استوانه‌ای با طول 5 cm و قطر داخلی و خارجی 0.2 cm و 11 cm تعریف شود، است. این دو مقدار را با استفاده از کد MCNP-4C بدست آورده و نتایج در جدول ۲-۴ آورده شده است.

جدول ۲-۴ مقادیر I_{tot} و I_u در رطوبتهای مختلف

I_{tot}/I_u	I_u	I_{tot}	θ_v
2.1878	9.212968×10^{-9}	2.015644×10^{-8}	0
2.736	8.427978×10^{-9}	2.305955×10^{-8}	0.02643
2.8148	8.817868×10^{-9}	2.482035×10^{-8}	0.07928
2.71025	9.033397×10^{-9}	2.44844×10^{-8}	0.13213
2.8629	9.581567×10^{-9}	2.743156×10^{-8}	0.18499

اگر مقدار ضریب انباشت را برای خاک خشک با B_0 و در رطوبت‌های دیگر برابر با B_1 ، B_2 و ... باشد. نسبت B_2/B_0 ، B_1/B_0 و ... در جدول ۳-۴ گزارش شده است.

جدول ۳-۴ نسب ضریب انباشت در هر رطوبت به حالت خشک

نسب ضریب انباشت در هر رطوبت به حالت خشک (B')	θ_v
1.25057	0.02643
1.2866	0.07928
1.2388	0.13213
1.3085	0.18499

با داشت B' از جدول ۳-۴ و مقادیر I₁ برای خاک خشک و I₂ در رطوبت‌های مختلف از جدول ۱-۴ و با استفاده از رابطه (۳-۴) می‌توان $\Delta\theta_v$ را بدست آورد که نتایج آن در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴ مقادیر بدست آمده برای $\Delta\theta_v$

خطای نسبی اندازه‌گیری رطوبت	$\Delta\theta_v$	θ_v
0.1325	0.022929	0.02643
0.0951	0.08682	0.07928
0.0999	0.14534	0.13213
0.0389	0.19249	0.18499

۲-۴ اندازه‌گیری رطوبت از روی پرتوهای پس‌پراکنده شده از سطح خاک

شرایطی را که در فصل قبل برای سامانه اندازه‌گیری رطوبت به این روش بدست آوردیم را اعمال کرده، یعنی چشمه را ²⁴¹Am در نظر گرفته و برای آن یک حفاظ ساخته و آن را روی پنجره آشکارساز (CsI(Tl) با ابعاد 1×1 in) نسب می‌کنیم و فاصله چشمه از سطح خاک را طوری تنظیم کرده که برابر با 0.1 cm شود. سامانه اندازه‌گیری در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

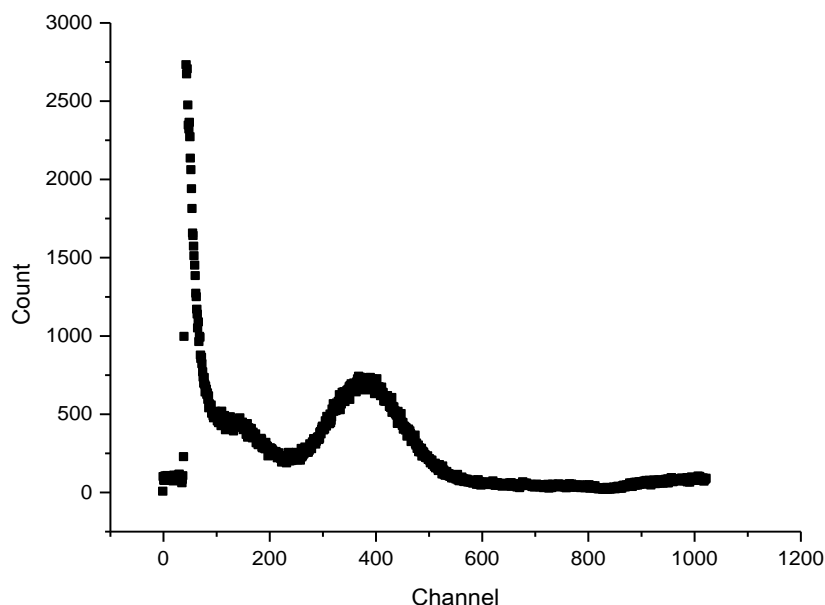


شکل ۳-۴ سامانه طراحی شده برای اندازه‌گیری رطوبت به روش پس‌پراکندگی (A) نشان دهنده حفاظ مربوط به چشمه که روی آشکارساز قرار گرفته است (B) کل سامانه اندازه‌گیری.

قله‌های فوتوپیک چشمه ^{241}Am در دو کانال 450 و 234 ایجاد شده که به ترتیب مربوط به انرژی keV 59.537 و 26.34 می‌باشند. بعد از کالیبره کردن رابطه انرژی با شماره کانال به صورت زیر است:

$$E = -9.46624 + 0.15297 \times ch$$

با توجه به این رابطه باید قله پراکندگی یگانه که انرژی آن برابر با 45.48 keV است در کانال 379 ایجاد شود و بعد گرفتن طیف خاک خشک این قله در کانال 380 ایجاد می‌شود البته باید توجه داشت که قله پراکندگی یگانه کانال شماره 379 را نیز شامل می‌شود (شکل ۴-۴) این طیف شامل آثار زمینه است.



شکل ۴-۴ طیف مربوط به رطوبت $\theta_m = 0.03$ ، طیف زمینه از آن کم نشده است و قله پراکندگی یگانه در کانال 380 ایجاد شده است.

در این قسمت نیز برای رطوبت‌های مختلف (جدول ۴-۵) طیف را ثبت کرده (گام افزایش رطوبت مانند قبل $\Delta\theta_m = 0.02$ در نظر گرفته می‌شود) طیف مربوط به حالت زمینه را از تمام این طیف‌ها کم می‌کنیم. در این قسمت لازم نیست که شماره کانال به انرژی تبدیل شود زیرا میزان افزایش مساحت زیر قله پراکندگی یگانه برای ما مهم است. روی این قله برازش گاوسی انجام داده و از نمودار حاصل انتگرال می‌گیریم. نتایج حاصل در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵ مقادیر مربوط به مساحت زیر قله فوتوپیک در رطوبت‌های مختلف همراه با خطا

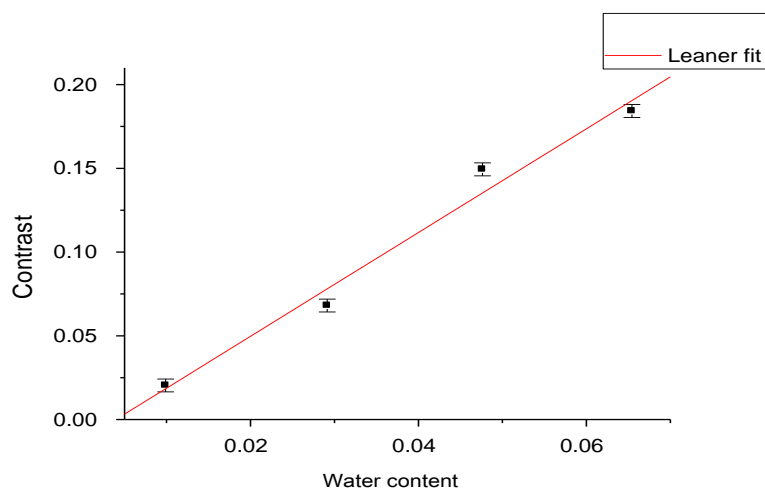
خطای محاسبه انتگرال	مساحت زیر قله فوتوپیک	خطای محاسبه رطوبت جرمی	رطوبت جرمی (U)	θ_m
120.7201	109643.3918	0	0	0
118.2051	112059.588	0.00025	0.00990	0.01
112.422	117108.4937	0.00024	0.02913	0.03
106.5864	126023.8306	0.00024	0.04762	0.05
114.0607	129844.0314	0.00023	0.06542	0.07

و مقادیر کنتراست برحسب رطوبت در جدول ۴-۶ آورده شده است.

جدول ۴-۶ مقادیر کنتراست برحسب رطوبت

خطای C	مقدار C	U	ردیف
0.0038502	0.02037	0.00990	1
0.003851	0.06808	0.02913	2
0.003859	0.14939	0.04762	3
0.003869	0.18424	0.06542	4

نمودار کنتراست برحسب رطوبت نموداری خطی با شیب 3.098 ± 0.3149 بدست می آید.



شکل ۴-۵ نمودار کنتراست برحسب رطوبت نموداری خطی با شیب 3.098 ± 0.3149

نتیجه گیری

با روش شبیه سازی مونت کارلو با استفاده از کد MCNP-4C توانستیم رطوبت را از مقادیر کم تا مقادیر زیاد به دو روش اندازه بگیریم .

در اندازه گیری با روش تضعیف باید مقطع های کوچک از خاک را در نظر گرفت تا بتوان اثر ضریب انباشت را در محاسبات کم کرد. اما در روش اندازه گیری رطوبت به روش پس پراکندگی می توان هر مقطعی از خاک را در نظر گرفت و اندازه گیری را در محل مورد مطالعه انجام داد.

چشمه مناسب برای اندازه گیری به روش تضعیف ^{60}Co است به علت انرژی بالا و برای اندازه گیری به روش پس پراکندگی ^{241}Am می باشد.

در محاسبه رطوبت به روش پس پراکندگی پرتوهای گاما به دو روش عمل می کنیم که در روش اول روی قله پراکندگی یگانه انتگرال گیری صورت گرفته و از روی آن کنتراست را بدست می آوریم به این روش برای منحنی کنتراست بر حسب رطوبت شیب خوبی بدست نیامد ولی اگر روی این قله برازش گائوسی انجام داده و از آن انتگرال گیری شود در این صورت نتیجه مطلوب بدست می آید. اگر چشمه واقعی را به کار برده و نمودار کنتراست بر حسب رطوبت رسم شود این منحنی شیب چندانی ندارد و این به علت پایین بودن سطح قله پراکندگی یگانه در مقابل سطح قله فوتوپیک است. برای رفع این مشکل چشمه برای چشمه یک حفاظ به ضخامت 0.2 cm تعریف می شود و وقتی که آشکارساز روی چشمه و در فاصله 0.6 cm از سطح خاک قرار دارد شیب مناسبی برای نمودار کنتراست بر حسب رطوبت بدست می آوریم.

آشکارساز واقعی دارای جداره های است که به علت وجود این جداره ها یک فاصله بین بلور آشکارساز و چشمه ایجاد می شود و این باعث کاهش شیب نمودار کنتراست بر حسب رطوبت می شود.

وجود هوا باعث تضعیف پرتوهای گسیل شده از چشمه و پرتوهای پراکنده شده از خاک می شود و به همین دلیل شیب نمودار کنتراست بر حسب رطوبت افزایش می یابد.

در اندازه گیری در آزمایشگاه پارامترهای زیادی دخیل هستند که باید تا حد امکان آن‌ها را کاهش داد از جمله دقت در انجام آزمایش و ثابت بودن سامانه اندازه گیری در طول آزمایش است. رطوبت به روش تجربی با روش تضعیف نیز با دقت خوبی اندازه گیری شد و کنتراست در تجربه نیز با افزایش رطوبت به طور خطی تغییر می کند.

مراجع

- [۱] ن. سولفانیدیس، ۱۳۷۱ ”اندازه‌گیری و آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای“ ترجمه ر. کوهی و م. هادیزاده یزدی، کتابستان مشهد
- [۲] D.Evans, 1955, ”The Atomic Nucleus “
- [۳] <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2>
- [۴] ع. مولوی و ک. جاویدان، ۱۳۸۵ ”کاربرد کامپیوتر در فیزیک“، دانشگاه تربیت معلم سبزواری
- [۵] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY; managed by ;UT-BATTELLE, LL for the U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, MCNP4C, Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Contributed by: Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2000
- [۶] اشکرافت، ۱۳۸۲، ”فیزیک خاک کاربردی“، ترجمه دکتر نادری، انتشارات دانشگاه بو علی سینا
- [۷] س. بیدریغ، ۱۳۷۷ ”کشت گل خانهای خیار، گوجه فرنگی و توت فرنگی“
- [۸] ا. امین زاده، ۱۸۸۳ ”رابطه آب و خاک و گیاه“ انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)
- [۹] م. دوستی، ۱۳۸۶ ”مدیریت آبیاری در گلخانه با استفاده از روش‌های نوین اندازه‌گیری رطوبت“
- [۱۰] Luiz F. Pires & et al, May 2005 “Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation”, Soil and Tillage Research , Volume 82, Issue 1 , Pages 89-97,
- [۱۱] Necati Celik & Ugur Cevik, June 2010 “Monte Carlo determination of water concentration effect on gamma-ray detection efficiency in soil samples” , Applied Radiation and Isotopes, Volume 68, Issue 6, Pages 1150-1153
- [۱۲] Jim Bilskie, Ph.D. 2001 Soil water status “content and potential”, Campbell Scientific Inc,
- [۱۳] D. Demir & et al; 2008 "Determination of photon attenuation coefficient, and field capacity of soil by gamma-ray transmission for 60, 356 and 662 keV gamma- ray"; Applied radiation and Isotopes 66, 1834-1837.
- [۱۴] A. filiz Baytas & Sevgi Akbl; 2001 "Determination of soil parameters by gamma-ray transmission"; Radiation measurements 35, 17-21.
- [۱۵] ح. توکلی عنبران، ۱۳۸۶ ”بررسی توانمندی روش پس‌پراکندگی فوتون‌های گاما در شناسایی مین‌های زمینی“، پایان‌نامه دکترای فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد،

[۱۶] V. Osorio and H. Peraza, Physics section IAEA, Chart of the nuclides NUCHAR for windows, Version 1.2, Feb

[۱۷] براون اثر دتریش، ۱۳۸۰، "روش‌های ساده در شناسایی پلاستیک‌ها" ترجمه کوکبی مهرداد، کار آفرینان بصیر

[۱۸] <http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>

[۱۹] F. Divos and S. Szegedi...1996 "local Densitometry of Wood by Gamma Back-Scattering";Holzals Roh-Und Werkstoff ,54, 279-281

[۲۰] M.Norpaiza, 2009 "The use of a neutron backscatter technique for in-situ water measurement in paper-recycling industry" Applied Radiation and Isotopes ,67 , 1239–1243

[۲۱] D. BUCURESCU and I. BUCURESCU; 2011 "Non-Destructive Measurement of Moisture in Building Materials by Compton Scattering of Gamma - Rays" ; Romanian Reports in Physics, 63,1. No , 61–75

هفدهمین کنفرانس فیزیک محاسبه رطوبت خاک با استفاده از پرتوهای گاما به روش شبیه‌سازی مونت کارلو

طاهره عباس آباد عربی، حسین توکلی عنبران*

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای

چکیده

یک باریکه موازی گاما در عبور از ماده تضعیف می‌شود که درصد آن به ضخامت و ضریب تضعیف خطی آن ماده بستگی دارد. با تغییر رطوبت خاک ضریب تضعیف خطی خاک جدید تغییر کرده و در نتیجه درصد تضعیف باریکه موازی گاما در عبور از آن، نسبت به حالت اول، تغییر می‌کند و از روی این تغییر می‌توان مقدار افزایش یا کاهش رطوبت خاک را بدست آورد. بر همین اساس در این تحقیق برای بدست آوردن قابلیت و دقت این روش در بدست آوردن رطوبت خاک از مقادیر بسیار کم تا مقادیر بالا، ابتدا با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از کد MCNP-4C اقدام به بررسی اثر انرژی باریکه گاما، ابعاد (ضخامت و قطر) نمونه خاک و مکان چشمه-نمونه خاک-آشکارساز شد تا اثر هر یک و حالت بهینه آنها مشخص شود و مشخص شد که با این روش می‌توان رطوبت خاک، از مقادیر بسیار پایین تا مقادیر بالا را با دقت بالایی بدست آورد و در نهایت برای یک نمونه تجربی محاسبات انجام شد.

کلید واژه: رطوبت خاک، پرتوهای گاما، شبیه‌سازی مونت کارلو، کد MCNP-4C

مقدمه

خاک از سه فاز جامد مایع و گاز تشکیل شده است. بسیاری از خصوصیات خاک به مقدار آب موجود در آن بستگی دارد که به آن رطوبت گفته می‌شود. فعالیت موجودات زنده و کنش‌های شیمیایی خاک تابعی از مقدار رطوبت است. دانستن رطوبت خاک به دو دلیل دارای اهمیت است، (۱) معلوم بودن مقدار رطوبت خاک جهت محاسبه مقدار آب مورد نیاز به صورت آبیاری و بارندگی و عمقی که مقدار معینی آب می‌تواند نفوذ کند، ضرورت دارد، (۲) با اندازه‌گیری‌های متوالی و مستمر مقدار رطوبت می‌توان مقدار تبخیر و تعریق که از مهمترین بخش تلفات آب در چرخه هیدرولوژی به شمار می‌رود را تعیین کرد. رطوبت خاک به دو روش مستقیم و غیر مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. در روش مستقیم مقادیر جرمی و حجمی رطوبت بطور مشخص اندازه‌گیری می‌شود ولی در روش غیر مستقیم باید ابتدا یک عامل دیگر که درصد رطوبت بر آن موثر است اندازه‌گیری شده و سپس از روی آن مقدار رطوبت تخمین زده شود. از روش‌های اندازه‌گیری رطوبت روش‌های حائز اهمیت

عباتند از: روش جرمی یا حجمی (از طریق خشک کردن نمونه خاک در کوره که همان روش وزنی است)، استفاده از دستگاه نوترون متر، تضعیف پرتو گاما و بلوک گچی می‌باشد. در کارهای مشابه که توسط دیگران انجام شده است [۱، ۲ و ۳] در محاسبات از فاز گازی خاک صرف نظر شده است، اما در این مقاله که از روش تضعیف پرتو گاما استفاده شده است محاسبات با در نظر گرفتن فاز گازی شکل خاک انجام شده است. این روش برای هر مقطعی از خاک استفاده می‌شود و بیشتر در کارهای تحقیقاتی به کار می‌رود. در این روش تضعیف باریکه گاما به انرژی آن، چگالی، ضخامت و رطوبت خاک بستگی دارد و اگر چگالی خاک خشک ثابت بماند می‌توان گفت که تغییرات شدت تابش به رطوبت خاک بستگی دارد [۱].

روش کار

اگر یک باریکه موازی و خیلی باریک گاما از یک ماده‌ای به ضخامت x عبور کند مطابق با معادله بیر-لامبرت (Beer-Lambert) به صورت زیر تضعیف می‌شود:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

که I و I_0 به ترتیب شدت اولیه و عبوری از ضخامت x و μ ضریب تضعیف خطی پرتوی گاما است. با تغییر رطوبت خاک تعداد عناصر هیدروژن و اکسیژن خاک و به تبعه آن درصد وزنی تک تک عناصر موجود در خاک تغییر کرده و در نهایت سبب تغییر ضریب تضعیف خاک مرطوب، نسبت به حالت قبل از آن می‌شود و در نتیجه درصد باریکه موازی پرتو گاما نسبت به حالت اول تغییر کرده و از روی این تغییر می‌توان اقدام به محاسبه رطوبت خاک کرد. برای یک ترکیب یا مخلوط، ضریب تضعیف جرمی از رابطه زیر بدست می‌آید [۴]:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i} w_i \quad (2)$$

μ_i ، w_i و ρ_i به ترتیب ضریب تضعیف خطی، درصد وزنی و چگالی حجمی هر ترکیب است. ماده مورد بررسی خاک است که از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده است و رابطه (۲) شامل سه جمله است.

$$\frac{\mu_{wet}}{\rho_{wet}} = \frac{\mu_s}{\rho_s} w_s + \frac{\mu_w}{\rho_w} w_w + \frac{\mu_a}{\rho_a} w_a \quad (3)$$

جمله سمت چپ تساوی مربوط به خاک مرطوب است که سه فاز دارد و ρ_{wet} ، ρ_s ، ρ_w ، ρ_a به ترتیب چگالی هوا، آب، خاک خشک و چگالی خاک مرطوب می‌باشد. μ_{wet} ، μ_s ، μ_w ، μ_a به ترتیب ضرایب تضعیف خطی

هوا، آب، خاک خشک و مرطوب هستند و در نهایت w_s, w_w, w_a به ترتیب درصد وزنی فاز گاز، مایع و جامد در خاک مورد مطالعه می‌باشند. اگر تضعیف ناشی از فاز هوا را ناچیز بگیریم و از آن صرف نظر کنیم، پس از ساده سازی به رابطه (۴-ا) می‌رسیم و در صورتی که از آن صرف نظر نشود به رابطه (۴-ب) می‌رسیم که در آن V_{wet} حجم خاک مرطوب، m_s جرم خاک خشک، V_w و V_a به ترتیب حجم آب و حجم هوای موجود در خاک است.

$$\mu_{wet} = \mu'_s \frac{m_s}{V_{wet}} + \mu_w \frac{V_w}{V_{wet}} \quad (a) \quad (4)$$

$$\mu'_{wet} = \mu'_s \frac{m_s}{V_{wet}} + \mu_w \frac{V_w}{V_{wet}} + \mu_a \frac{V_a}{V_{wet}} \quad (b)$$

بنا به تعریف نسبت جرم فاز جامد خاک به حجم خاک مرطوب را چگالی ظاهری ($\rho'_s = \frac{m_s}{V_{wet}}$)، نسبت حجم

آب به حجم خاک مرطوب را رطوبت حجمی ($\theta_v = \frac{V_w}{V_{wet}}$)، نسبت جرم آب به جرم خاک مرطوب را رطوبت

جرمی ($\theta_m = \frac{m_w}{m_{wet}}$) و نسبت حجم هوای موجود در خاک به حجم خاک مرطوب را هوای نسبی خاک

مرطوب ($\theta_a = \frac{V_a}{V_{wet}}$) می‌نامیم. پس رابطه‌ی (۱) به دو صورت زیر در می‌آید:

$$I = I_0 \exp[-(\mu'_s \rho'_s + \theta_v \mu_w)x] \quad (a)$$

$$I = I_0 \exp[-(\mu'_s \rho'_s + \theta_v \mu_w + \theta_a \mu_a)x] \quad (b) \quad (5)$$

با توجه به اینکه چگالی آب یک است، پس ضریب تضعیف خطی آب با ضریب جرمی آن برابر است. در نهایت وقتی یک باریکه خیلی نازک و موازی از پرتوهای گاما از یک نمونه خاک به ضخامت x عبور کند تضعیف مربوط به این باریکه از یکی از دو رابطه (۵) پیروی می‌کند که بستگی به نادیده گرفتن یا نگرفتن فاز گازی خاک دارد. لذا از روی آن می‌توان با داشتن مقادیر $x, \mu_a, \mu_w, \rho'_s, \mu'_s$ رطوبت حجمی را از یکی از دو رابطه زیر بدست آورد:

$$\theta_v = \frac{-1}{x\mu_w} \left[\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) + \rho'_s \mu'_s x \right] \quad (a) \quad (6)$$

$$\theta_v = \frac{-1}{x\mu_w} \left[\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) + \rho'_s \mu'_s x + \theta_a \mu_a x \right] \quad (b)$$

از آنجا که ما در این تحقیق اثر فاز گاز خاک را هم در نظر گرفته‌ایم از فرمول (۶-b) استفاده شده است. با استفاده از کد MCNP-4C برای یک ضخامت مشخص (x) از خاک مورد مطالعه و مشخص بودن مقادیر $\mu_s \rho'_s, \mu_w, \theta_a \mu_a$ می‌توان با بدست آوردن نسبت شار عبور کرده به شار اولیه برای پرتوهای گاما با یک انرژی خاص و با قرار دادن مقادیر فوق در رابطه (۶-b) مقدار رطوبت حجمی (θ_v) را بدست آورد و از روی آن رطوبت جرمی را هم محاسبه کرد. در شبیه‌سازی مونت‌کارلو از کد MCNP-4C و تالی F2 بر حسب انرژی با پهنای انرژی $\Delta E = 10^{-5}$ MeV بر روی سطح پنجره آشکارساز استفاده شده است تا از روی آن تعداد پرتوهای عبوری از ضخامت x خاک بدون اندرکنش (درنتیجه انرژی آن با انرژی پرتوهای گامای چشمه یکسان است با خطای $\Delta E = 10^{-5}$ MeV) بدست آید. چشمه یک باریکه موازی به شعاع سطح مقطع 0.0001 cm و انرژی‌های مشخص شده در جدول ۲، آشکار ساز از نوع CsI(Tl) دارای ابعاد 1×2 in با پنجره‌ای به سطح 5.06707 cm² و نمونه خاک استوانه‌ای به شعاع 0.1 cm که در فاصله 10 cm از آشکارساز قرار داده شده است. نمونه خاک تجربی دارای چگالی 1.056 g.cm⁻³، رطوبت 0.634% و PH 8.72 است که عناصر و درصد وزنی آن در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱: عناصر موجود در نمونه خاک تجربی به همراه درصد وزنی هر یک.

عنصر	H	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
درصد وزنی	0.03760	0.05936	0.55856	0.00075	0.03627	0.00940	0.3456	0.00083	0.04494	0.02381

با توجه به معادله (۶-b) باید مقادیر $\mu_s \rho'_s, \mu_w, \theta_a \mu_a$ و x معلوم باشد تا بتوان رطوبت را اندازه گیری کرد. اما در مورد این نمونه تجربی، مقادیر $\mu_s \rho'_s$ و $\theta_a \mu_a$ را نداریم. با توجه به این نکته که رطوبت اولیه خاک معلوم است، می‌توان برای یک ضخامت معین خاک و انرژی معلوم چشمه، تالی F2 را بدست آورد و از روی آن و با توجه به رابطه (۶-b) و مشخص بودن سایر مقادیر، مقدار $\mu_s \rho'_s + \theta_a \mu_a$ را بدست آورد. حال با داشتن مقدار $\mu_s \rho'_s + \theta_a \mu_a$ ، یک رطوبت معین به نمونه خاک اضافه کرده و سعی می‌کنیم با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقدار رطوبت را اندازه گیری کنیم. سپس به بررسی اثر تغییر انرژی چشمه بر روی این اندازه گیری و درصد خطای آن و بدست آوردن حالت بهینه پردازیم.

نتایج

در جدول ۲ مقادیر $\mu'_s \rho'_s + \theta_a \mu_a$ و مقدار تالی F2 در هر انرژی چشمه بیان شده است. در جدول ۳ نتایج محاسبه رطوبت برای چند حالت متفاوت خاک با رطوبتهای متفاوت در انرژی 0/5 MeV پرتوهای گاما و ضخامت 1/5 cm نمون خاک بیان شده است.

جدول ۲- مقادیر $\mu'_s \rho'_s + \theta_a \mu_a$ در انرژی های مختلف.

انرژی (MeV)	$f2(cm^{-2})$	$\mu'_s \rho'_s + \theta_a \mu_a (cm^{-1})$
0/05	0/150572	0/539784
0/10	0/158636	0/271929
0/50	0/159943	0/139504
0/80	0/160819	0/113231
1/00	0/160859	0/101784

توجه شود که در صورت اضافه کردن رطوبت، درصد وزنی عناصر در خاک و چگالی آن تغییر می کند که باید آنها را بدست آورد و در کد اعمال کرد.

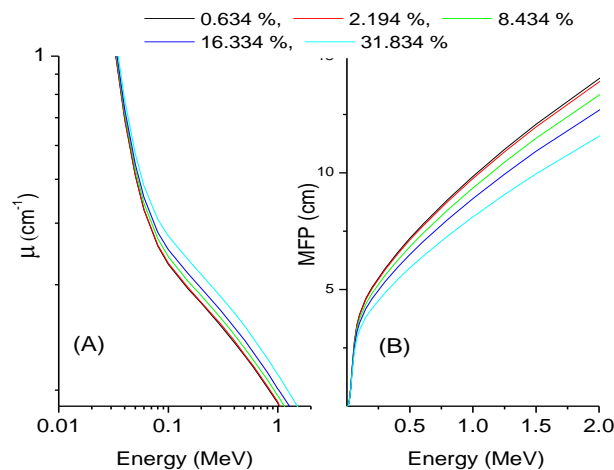
جدول ۳: میزان دقت کد در تشخیص رطوبت اولیه در مقابل رطوبت اضافه شده با چشمه ای به انرژی (0/5 MeV)

خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد (%)	$f2(1/cm^2)$	رطوبت بدست آمده با کد MCNP (%)	رطوبت خاک جدید (%)
0/13	0/159981	2/197	2/194
0/77	0/158145	8/369	8/434
0	0/156368	16/234	16/234
0/07	0/152868	31/857	31/834

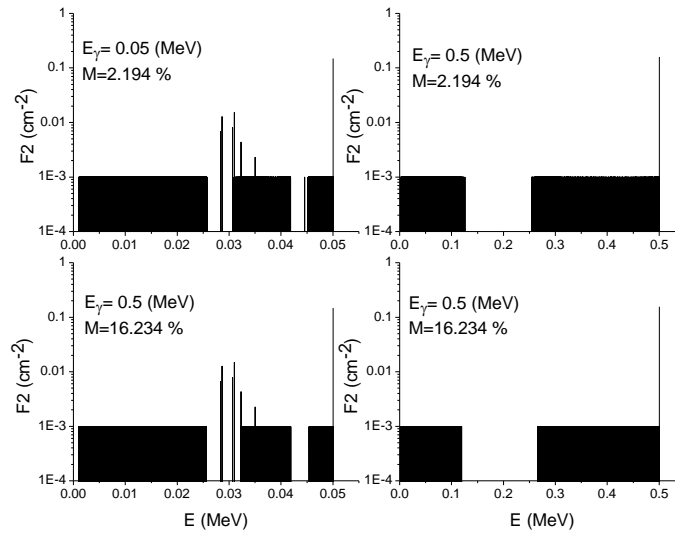
برای انرژی 0/05 MeV در ضخامت 0/5 cm استوانه خاک که حداکثر یک چهارم مسافت آزاد میانگین پرتو گاما در این انرژی است و همچنین برای انرژی 0/1 MeV محاسبات را تکرار کردیم تا انرژی مناسب برای چشمه بدست آید. اگر همین کار را با انرژی 0/1 MeV انجام دهیم، داده ها کمی به رطوبت واقعی نزدیک می شود. شکل ۱ نمودار مقایسه تغییر ضریب تضعیف خطی خاک و پویش آزاد متوسط فوتون بر حسب انرژی پرتو گاما برای چند رطوبت متفاوت است و شکل ۲ نمودار مقایسه شار سطحی بر حسب انرژی برای دو انرژی 0/5 MeV و 0/05 پرتوهای گامای فرودی در دو رطوبت 2/194٪ و 16/234٪ است.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج در می‌یابیم که خطای اندازه‌گیری رطوبت به انرژی پرتو گاما بستگی دارد. به عنوان نمونه در انرژی 0.05 MeV و برای خاکی با رطوبت 8/434٪، مقدار بدست آمده از روی کد 8/369٪ است که دارای خطای 0/77٪ با مقدار واقعی می‌باشد و در انرژی 0.1 MeV، مقدار رطوبت از روی کد 8/446٪ با خطای 0/14٪ بدست می‌آید. لذا بهترین مقدار در انرژی (0.05 MeV) و برای حالتی که مقدار رطوبت 8/334٪ است، اتفاق می‌افتد. با توجه به این بررسی و با توجه به شکل 1 (A) هم مشاهده می‌شود که در انرژی‌های بالاتر اختلاف بین ضریب تضعیف خاک با رطوبت‌های متفاوت بیشتر می‌شود و لذا تشخیص و تفکیک آنها بهتر است، پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش انرژی خطای بین مقدار واقعی و محاسبه شده از روی کد MCNP-4C کاهش می‌یابد و در ضمن می‌توان رطوبت را از روی تضعیف پرتو گاما از خاک مورد مطالعه، با دقت بالا، با داشتن چشمه‌ی مناسب پیدا کرد. همچنین در این تحقیق نقش تضعیف ناشی از فاز گاز خاک را نیز در نظر گرفته شده است، که در کارهای که تا کنون انجام شده این تاثیر در نظر گرفته نشده است. لازم به ذکر است که کارهای تجربی مربوط به این کار در حال انجام است که به زودی در مقاله‌ای دیگر ارائه می‌شود.



شکل 1: نمودار (A) و (B) به ترتیب ضریب تضعیف خطی خاک و پویش آزاد متوسط بر حسب انرژی پرتو گاما برای رطوبتهای متفاوت خاک است.



شکل ۲: مقایسه نمودار شار سطحی (F2) روی پنجره آشکارساز CsI(Tl) برحسب انرژی برای دو انرژی ۰/۰۵ و ۰/۵ MeV پرتوهای گاما در دو رطوبت ۲/۱۹۴٪ و ۱۶/۲۳۴٪ با پهنای انرژی $\Delta E = 10^{-5}$ MeV است. توجه شود به علت کوچک بودن پهنای هر کانال (ΔE) در شبیه‌سازی تعداد کانال‌ها خیلی زیاد شده است و قسمت‌های سیاه رنگ که به ظاهر پیوسته است ناشی از آن است.

مراجع

- [1] Luiz F. Pires & et al, Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation, Soil and Tillage Research, Volume 82, Issue 1, Pages 89-97, May 2005
- [2] Necati Celik & Ugur Cevik, Monte Carlo determination of water concentration effect on gamma-ray detection efficiency in soil samples, Applied Radiation and Isotopes, Volume 68, Issue 6, Pages 1150-1153, June 2010
- [3] Jim Bilskie, Ph.D. Soil water status: content and potential, Campbell Scientific Inc, 2001
- [4] Nicholas Tsoulfanidis, Measurement and detection of radiation, Taylor & Francis, pages 614, 1995

دوازدهمین کنگره خاک

اثر ظرف در اندازه‌گیری رطوبت خاک با پرتوهای گاما به روش شبه‌سازی مونت کارلو

طاهره عباس آباد عربی و حسین توکلی عنبران*

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای

(آدرس پست الکترونیکی مکاتبه کننده tavakoli.anbaran@gmail.com)

در اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از پرتوی گاما از درصد تضعیف آن پرتو در عبور از خاک استفاده می‌شود که خود با افزایش یا کاهش رطوبت دچار تغییر می‌شود. در عمل خاک مورد مطالعه درون ظرف قرار دارد و در نتیجه سبب تضعیف بیشتر دسته پرتوی گاما و خطا در اندازه‌گیری رطوبت می‌شود. در این تحقیق با بررسی پارامترهایی همچون انرژی باریکه گاما، مکان چشمه-نمونه-خاک-آشکارساز و ... بر روی خطای حاصل از حضور ظرف اقدام به بهینه کردن سیستم اندازه‌گیری و افزایش دقت روش فوق شد. ابتدا با استفاده از کد MCNP-4C سامانه مورد مطالعه شبیه‌سازی شد. سپس برای یک نمونه تجربی محاسبات انجام شد. در نهایت در شرایط بهینه رطوبت خاک، با دقت بالایی بدست آمد و مشخص شد با افزایش انرژی پرتوی گاما خطای حاصل از اثر ظرف در محاسبه رطوبت خاک، کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: اثر ظرف، پرتوی گاما، رطوبت خاک، شبیه‌سازی مونت کارلو، کد MCNP-4C

مقدمه

خاک از سه فاز جامد مایع و گاز تشکیل شده است. بسیاری از خصوصیات خاک به مقدار آب موجود در آن بستگی دارد. فعالیت موجودات زنده و کنش‌های شیمیایی خاک تابعی از مقدار رطوبت است. دانستن رطوبت خاک به دو دلیل دارای اهمیت است، (۱) معلوم بودن مقدار رطوبت خاک جهت محاسبه مقدار آب مورد نیاز به صورت آبیاری و بارندگی و عمقی که مقدار معینی آب می‌تواند نفوذ کند، ضرورت دارد، (۲) با اندازه‌گیری‌های متوالی و مستمر مقدار رطوبت می‌توان مقدار تبخیر و تعریق که از مهمترین بخش تلفات آب در چرخه هیدرولوژی به شمار می‌رود را تعیین کرد. مهمترین روش‌های اندازه‌گیری رطوبت عبارتند از: روش جرمی یا حجمی (از طریق خشک کردن نمونه خاک در کوره که همان روش وزنی است)، استفاده از دستگاه نوترون متر، تضعیف پرتو گاما و بلوک گچی. در کارهای مشابه که توسط دیگران انجام شده است (Baytas, 2001)، (Bilskie, 2001)، (Celik, 2010)، (Demir, 2008)، (Pires, 2005) در محاسبات از فاز گازی خاک صرف نظر شده بود، که ما در کار قبلی خود (عباس آباد عربی ط، ۱۳۸۹) با استفاده از روش تضعیف پرتو گاما رطوبت خاک را با در نظر گرفتن فاز گازی آن بدست آوردیم. اما در این تحقیق در ادامه تکمیل کار قبلی با بهینه کردن سامانه اندازه‌گیری به دنبال کاهش اثر ظرف بر روی اندازه‌گیری رطوبت می‌باشیم. در این روش تضعیف باریکه گاما به انرژی آن، چگالی،

ضخامت و رطوبت خاک بستگی دارد و اگر چگالی خاک خشک ثابت بماند می‌توان گفت که تغییرات شدت تابش به رطوبت خاک بستگی دارد (Baytas, 2001)، (Demir, 2008)، (Pires, 2005).

مواد و روش‌ها

اگر یک باریکه موازی و خیلی باریک گاما از یک ماده‌ای به ضخامت x عبور کند مطابق با معادله بیر-لامبرت (Beer-Lambert) به صورت زیر تضعیف می‌شود:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad [1]$$

که I و I_0 به ترتیب شدت اولیه و عبوری از ضخامت x و μ ضریب تضعیف خطی پرتوی گاما است. با تغییر رطوبت خاک تعداد عناصر هیدروژن و اکسیژن خاک و به تبعه آن درصد وزنی تک تک عناصر موجود در خاک تغییر کرده و در نهایت سبب تغییر ضریب تضعیف خاک مرطوب، نسبت به حالت قبل از آن می‌شود و در نتیجه درصد باریکه موازی پرتو گاما نسبت به حالت اول تغییر کرده و از روی این تغییر می‌توان اقدام به محاسبه رطوبت خاک کرد. خاک از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده است، لذا ضریب تضعیف جرمی آن از رابطه زیر بدست می‌آید (Tsoulfanidis, 2008):

$$\frac{\mu_{wet}}{\rho_{wet}} = \frac{\mu_s}{\rho_s} W_s + \frac{\mu_w}{\rho_w} W_w + \frac{\mu_a}{\rho_a} W_a \quad [2]$$

جمله سمت چپ تساوی مربوط به خاک مرطوب است که سه فاز دارد و ρ_{wet} ، ρ_s ، ρ_w ، ρ_a به ترتیب چگالی هوا، آب، خاک خشک و چگالی خاک مرطوب می‌باشد. μ_{wet} ، μ_s ، μ_w ، μ_a به ترتیب ضرایب تضعیف خطی هوا، آب، خاک خشک و مرطوب هستند و در نهایت W_s ، W_w ، W_a به ترتیب درصد وزنی فاز گاز، مایع و جامد در خاک مورد مطالعه می‌باشند. پس از ساده سازی رابطه [۲] داریم:

$$\mu_{wet} = \mu'_s \frac{m_s}{V_{wet}} + \mu_w \frac{V_w}{V_{wet}} + \mu_a \frac{V_a}{V_{wet}} \quad [3]$$

که در آن V_a ، V_w ، V_{wet} به ترتیب حجم خاک مرطوب، حجم آب و حجم هوای موجود در خاک، m_s جرم خاک خشک و μ'_s ضریب تضعیف خاک است. بنا به تعریف نسبت جرم فاز جامد خاک به حجم خاک مرطوب را چگالی ظاهری ($\rho'_s = \frac{m_s}{V_{wet}}$)، نسبت

حجم آب به حجم خاک مرطوب را رطوبت حجمی ($\theta_v = \frac{V_w}{V_{wet}}$)، نسبت حجم هوای موجود در خاک به حجم خاک مرطوب را هوای

نسبی خاک مرطوب ($\theta_a = \frac{V_a}{V_{wet}}$) می‌نامیم. پس رابطه‌ی [۱] به صورت زیر در می‌آید:

$$I = I_0 \exp[-(\mu'_s \rho'_s + \theta_v \mu_w + \theta_a \mu_a)x] \quad [4]$$

با توجه به اینکه چگالی آب (1 g.cm^{-3}) است می‌توان $\mu_w = \mu'_w$ گرفت و از روی آن با داشتن مقادیر $\mu'_s \rho'_s$ ، μ'_w ، $\theta_a \mu_a$ ، x و قرار دادن در رابطه [۴] رطوبت حجمی را از رابطه زیر بدست آورد:

$$\theta_v = \frac{-1}{x\mu'_w} \left[\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) + \rho'_s \mu'_s + \theta_a \mu_a \right] \quad [5]$$

با استفاده از کد MCNP-4C برای یک ضخامت معین خاک (X)، با مشخص بودن مقادیر $\mu'_s, \rho'_s, \mu'_w, \theta_a, \mu_a$ نسبت شار عبور کرده به شار اولیه پرتوی گاما در یک انرژی خاص بدست می‌آید و با قرار دادن این مقدار در رابطه [۵] رطوبت حجمی (θ_v) و رطوبت جرمی قابل محاسبه است. در شبیه‌سازی مونت کارلو از کد MCNP-4C و تالی F2 بر حسب انرژی با پهنای انرژی $\Delta E = 10^{-5} \text{ MeV}$ بر روی سطح پنجره آشکارساز استفاده شد تا از روی آن تعداد پرتوهای عبوری از ضخامت X خاک بدون اندرکنش (در نتیجه انرژی آن با انرژی پرتوهای گامای چشمه یکسان است با خطای $\Delta E = 10^{-5} \text{ MeV}$) بدست آید. آشکار ساز از نوع CsI(Tl) به ابعاد $1 \times 2 \text{ in}$ ، نمونه خاک تجربی در استوانه‌ای به شعاع داخلی 0.5 cm و ضخامت 0.15 cm ، که انتهای بسته آن به صورت نیم کره با همان شعاع و ضخامت، در فاصله 10 cm از آشکارساز قرار داده شده است دارای چگالی 1.56 g.cm^{-3} ، رطوبت 0.634% و PH 8.72 است و چشمه یک باریکه موازی به شعاع سطح مقطع 0.5 cm است که جزئیات آنها به ترتیب در جداول ۱ و ۲ بیان شده‌اند.

جدول ۱- عناصر موجود در نمونه خاک تجربی به همراه درصد وزنی هر یک.

عناصر	H	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
درصد وزنی	0.376	0.5936	0.58856	0.00075	0.3627	0.0094	0.3456	0.00083	0.4498	0.2381

برای آن که شبیه‌سازی با واقعیت مطابقت داشته باشد، در شبیه‌سازی برای خاک یک ظرف در نظر گرفته شده است. ظرف پلاستیکی استفاده شده، ترکیبی از 75% کیلیمر استایرن و 25% آکریلونیتریل با فرمول $C_{27}H_{27}N$ ، چگالی 1.08 g/cm^3 و معروف به SAN است (براون، ۱۳۸۰) و (<http://>). حضور ظرف سبب افزایش تضعف باریک گاما می‌شود و این اثر دقت اندازه‌گیری رطوبت را کاهش می‌دهد. برای بدست آوردن تضعیف پرتوهای گامای ناشی از حضور ظرف خاک، ابتدا ظرف بدون خاک را در سامانه اندازه‌گیری رطوبت قرار داده، سپس شار رسیده به پنجره آشکارساز را ثبت می‌کنیم و در مرحله دوم همین فرایند را بدون حضور ظرف انجام می‌دهیم و از تفاضل این دو، تضعیف پرتوهای گامای ناشی از حضور ظرف به تنهای بدست می‌آید.

جدول ۲- مقادیر شار سطحی (F2) در دو حالت به همراه شار تضعیف شده ناشی از حضور ظرف برای دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs .

چشمه	تالی (cm ²) F2 بدون ظرف	تالی (cm ²) F2 برای وقتی ظرف خالی است	تضعیف پرتوهای ناشی از ظرف
^{137}Cs	0.1937353	0.1937223	0.001296
^{60}Co	0.986882	0.973920	0.03633

حال اگر نمونه خاک درون ظرف را در سامانه قرار داده و شار سطحی روی پنجره آشکارساز را بدست آوریم و اثر ظرف خاک (که در ابتدا محاسبه شد) را از آن کم کنیم تضعیف شار ناشی از خاک به تنهایی بدست می‌آید و با قرار دادن در رابطه [۵] مقدار رطوبت خاک بدست می‌آید.

نتایج و بحث

در جدول ۳ و ۴ به ترتیب نتایج محاسبه رطوبت خاک به همراه خطای آنها برای دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs با استفاده از کد MCNP-4C در دو حال بدون تصحیح اثر ظرف و تصحیح آن بیان شده است. در این تحقیق به دنبال اثر ظرفی که خاک در داخل آن قرار داده شده است و حذف اثر آن بر روی رطوبت محاسبه شده بودیم. در اینجا از ظرف پلاستیکی به خاطر چگالی پایین آن استفاده کردیم این

ویژگی باعث تضعیف کمتر پرتوهای گاما شده و در نتیجه خطای کمتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک ایجاد می‌کند. با توجه به جدول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که خطای اندازه‌گیری با چشمه ^{60}Co کمتر است زیرا پرتوهای گامای این چشمه (۱/۱۷ MeV و ۱/۳۳) در مقایسه با پرتوهای گامای چشمه ^{137}Cs (۰/۶۶ MeV) بیشتر است و این سبب می‌شود که نفوذ پرتوی گاما در ماده بیشتر باشد و در نتیجه تاثیر ظرف خاک بر روی تضعیف پرتوی گاما کمتر شده و در نتیجه خطای محاسبه رطوبت کاهش می‌یابد.

جدول ۳- مقایسه میزان دقت کد در تشخیص رطوبت و خطای ناشی از اثر ظرف با چشمه ^{137}Cs .

رطوبت خاک واقعی (%)	رطوبت بدست آمده با کد بدون ظرف (%)	خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد بدون ظرف (%)	رطوبت بدست آمده با کد به همراه ظرف (%)	خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد به همراه ظرف (%)
۲/۱۹۴	۲/۱۵۲	۱/۸۹۶	۲/۱۳۵	۲/۶۸۹
۵/۳۱۴	۵/۱۷۸	۲/۵۵۱	۵/۱۷۶	۲/۶۰۱
۸/۴۳۴	۸/۲۴۹	۲/۷۵۹	۸/۱۱۹	۳/۷۲۷
۱۶/۲۳۴	۱۵/۸۷۸	۲/۹۸۷	۱۵/۶۱۲	۳/۸۳۱
۲۴/۰۳۴	۲۳/۴۸۱	۴/۰۸۷	۲۳/۱۴۳	۴/۹۱۹

جدول ۴- مقایسه میزان دقت کد در تشخیص رطوبت و خطای ناشی از اثر ظرف با چشمه ^{60}Co .

رطوبت خاک واقعی (%)	رطوبت بدست آمده با کد بدون ظرف (%)	خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد بدون ظرف (%)	رطوبت بدست آمده با کد به همراه ظرف (%)	خطای نسبی بین مقدار واقعی و بدست آمده از روی کد به همراه ظرف (%)
۲/۱۹۴	۲/۱۵۵	۱/۸۹۶	۲/۱۶۸	۱/۲۰۱
۵/۳۱۴	۵/۲۰۱	۰/۱۲۱	۵/۲۶۶	۰/۸۹۸
۸/۴۳۴	۸/۲۴۹	۲/۱۸۷	۸/۱۷۷	۳/۰۵۲
۱۶/۲۳۴	۱۵/۸۷۸	۲/۱۹۱	۱۵/۶۹۵	۳/۳۲۰
۲۴/۰۳۴	۲۳/۴۸۱	۳/۵۲۹	۲۳/۴۲۷	۳/۷۴۹

مراجع

- Baytas AF & Sevgi Ak, May 2001, Determination of soil parameters by gamma-ray transmission, Radiation measurements, Volum 35, Page 17-21
- Bilskie J, Ph.D , 2001 Soil water status: content and potential, Campbell Scientific Inc
- Celik N & Cevik U, June 2010, Monte Carlo determination of water concentration effect on gamma-ray detection efficiency in soil samples, Applied Radiation and Isotopes, Volume 68, Issue 6, Pages 1150-1153

Demir D & et al, April 2008, Determination of photon attenuation coefficient, porosity and field capacity of soil by gamma-ray transmission for 60, 356 and 662 keV gamma ray, Applied radiation and Isotopes, Volum 66, Pages 1834-1837

Pires LF & et al, May 2005, Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation, Soil and Tillage Research, Volume 82, Issue 1, Pages 89-97

عباس آباد عربی ط، توکلی عنبران ح، ۱۳۸۹، محاسبه رطوبت خاک با استفاده از پرتوهای گاما به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، هفدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، اصفهان

Tsoufanidis N , 2008, Measurement and detection of radiation

براون اثر دتریش، ۱۳۸۰، روش‌های ساده در شناسایی پلاستیک‌ها، ترجمه کوکبی مهرداد، کار آفرینان بصیر

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>

کنفرانس فیزیک ایران

محاسبه رطوبت خاک با استفاده از پس پراکندگی پرتوهای گاما، با روش مونت کارلو

عباس آباد عربی، طاهره و توکلی عنبران، حسین

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

چکیده

یکی از روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده از پس پراکندگی پرتوهای گاما از سطح خاک است. برهم‌کنش‌های پرتوی گاما با ماده عمدتاً شامل پدیده‌های فوتوالکتریک، کامپتون، و تولید زوج هستند. در پراکندگی کامپتون هم انرژی و هم جهت پرتوی فرودی تغییر می‌کند. در صورتی که زاویه پراکندگی بیشتر از 90° باشد، پس پراکندگی کامپتون رخ می‌دهد. در این تحقیق، برای اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از روش مونت کارلو، با کد MCNP-4C حالت بهینه انرژی پرتوی گاما، موقعیت چشمه-آشکارساز از سطح خاک و فاصله‌ی آن دوازده یکدیگر (با استفاده از یک نمونه تجربی برای فایل ورودی کد MCNP-4C) محاسبه شد. از نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو مشخص شد که با بهینه‌سازی موارد فوق می‌توان رطوبت خاک را از مقادیر کم تا زیاد بدست آورد. در ضمن این روش اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌تواند مستقیماً در محل مورد نظر مثل مزرعه مورد استفاده قرار گیرد.

Calculation of soil moisture content using gamma-rays backscattering, with Monte Carlo Method

Tavakoli Anbaran, Hossain; Abbas Abad Arabi, Tahere

Department of Physics, Faculty of Physics, Shahrood University of Tecnology, Shahrood

Abstract

One of the methods to measure the soil moisture is the use of the backscattering gamma-ray on the soil surface. Gamma-ray interactions with matter occur mainly through three phenomena photoelectric, Compton scattering and pair production. The both incident beam energy and its direction will change in Compton scattering. The Compton backscattering occurs when the Compton scattering angle was greater than 90 degree. In this study, the optimum amounts of the gamma-ray energy, the source-detector distance and the both source and detector distance from the soil surface were obtained by MCNP-4C code for measuring the soil moisture using Monte Carlo method (using an experimental sample for the input file of MCNP-4C code). The results of Monte Carlo simulations indicated that the soil moisture of low to high values can be obtained by the

optimal above cases. This method of the measuring soil moisture can directly be used in desired location such as farm.

PACS No. 89

می‌افتد. در پراکندگی کامپتون هم انرژی و هم جهت پرتوی گاما تغییر می‌کند.

مقدمه

$$E'\gamma = \frac{E\gamma}{1 + \frac{1 - \cos\theta}{m_0c^2} E\gamma} \quad (1)$$

که در آن E_γ و $E'\gamma$ به ترتیب انرژی پرتوهای گامای فرودی و پراکنده شده، θ زاویه پراکندگی و m_0c^2 جرم سکون الکترون می‌باشند. احتمال رخ داد پراکندگی کامپتون در واحد طول مسیر پرتو از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma \approx \rho \frac{N_A}{A} f(E_\gamma) \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی ماده‌ای که پرتو گاما به آن تابانده می‌شود N_A عدد آوگادرو، A عدد جرمی ماده، Z عدد اتمی ماده مورد نظر و $f(E_\gamma)$ تابعی بر حسب انرژی است. با توجه به رابطه ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی احتمال پراکندگی پرتوهای گاما در ماده بیشتر می‌شود. اگر پراکندگی در زاویه بیشتر از 90° صورت گیرد در اصطلاح پس‌پراکندگی اتفاق افتاده است. در این کار به دنبال اندازه‌گیری رطوبت خاک از روی پس-پراکندگی پرتوهای گاما از سطح خاک هستیم. نمونه خاک تجربی دارای چگالی $1/56 \text{ g.cm}^{-3}$ ، رطوبت $0/634\%$ و $\text{PH } 8/72$ است که عناصر و درصد وزنی آن در جدول ۱ بیان شده است. ابعاد سلول خاک $70 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ ، از دو چشمه‌ی پرتوی گامای ^{241}Am و ^{60}Co که مشخصات آنها در جدول ۲ بیان شده است

روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به کار می‌رود که هر کدام معایب و مزایایی دارند. برای اندازه‌گیری به روش TDR، تنسیونتر و بلوک گچی و باید منحنی رطوبت را داشته باشیم تا بتوانیم با این دستگاه‌ها کار کنیم [۱]. یکی از این روش‌ها اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از تضعف پرتو گاما است که اندازه‌گیری بطور مستقیم و بدون داشتن منحنی رطوبت انجام می‌شود، کارهای زیادی در این مورد انجام شده است [۲-۶]. در کار قبلی، ما رطوبت را با این روش بدست آوردیم [۷]. اما در این کار جدید، با استفاده از پس-پراکنده پرتوهای گامای از سطح خاک، می‌توان رطوبت خاک را بدست آورد. اندازه‌گیری رطوبت به روش تضعیف پرتوهای گاما تنها برای نمونه‌های کوچک و در کارهای تحقیقاتی بکار می‌رود در حالی که در اندازه-گیری رطوبت خاک از روی پس‌پراکندگی پرتوهای گاما می‌توان یک حجم بی‌نهایت خاک داشت و در کوتاه‌ترین زمان ممکن اندازه‌گیری را در مزرعه، بدون آوردن نمونه به آزمایشگاه انجام داد.

روش محاسبات و نتایج

برهم‌کنش پرتوی گاما با عمدتاً ماده به سه طریق فوتوالکتریک، پراکندگی کامپیون و تولید زوج اتفاق

هستند. مقدار کنتراست را برای تمام بین‌های انرژی در فواصل مختلف آشکارساز-چشمه از سطح خاک (cm) ۱، ۲، ۵ و ۱۰، محاسبه شدند. نتایج آن در شکل‌های ۱ تا ۴ نمایش داده شده است. مقادیر کنتراست برای وقتی که اطراف آشکارساز موازی‌ساز قرار گرفته است برای چشمه ^{241}Am در شکل ۵ آمده است. برای بررسی قدرت تشخیص این روش در رطوبتهای پایین، رطوبت

و آشکارساز CsI(Tl) با ابعاد شده است و آشکارساز CsI(Tl) با ابعاد 1×2 in در شبیه‌سازی با کد MCNP-4C استفاده شده است. کمیتی به نام کنتراست که معرف اختلاف نسبی به درصد، بین کمیت مورد مطالعه در یک وضعیت نسبت

جدول ۱: عناصر موجود در خاک با درصد وزنی هر عنصر [۸]

عنصر	H	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
درصد وزنی	۰/۰۳۷۶۰	۰/۰۵۹۳۶	۰/۵۵۸۵۶	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۳۶۲۷	۰/۰۰۹۴۰	۰/۳۴۵۶	۰/۰۰۰۸۳	۰/۰۴۴۹۴	۰/۰۲۳۸۱

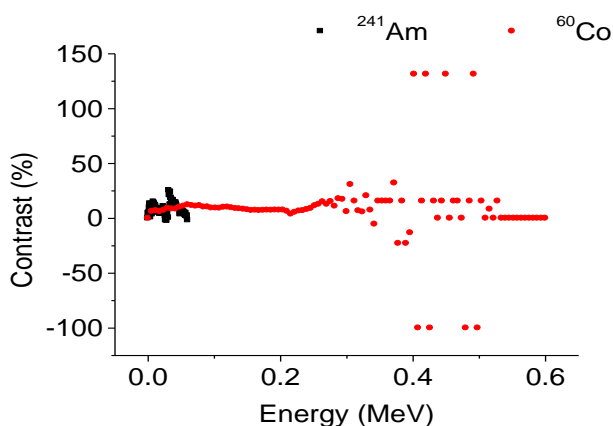
را از ۰/۰۱٪ به ۰/۱٪، ۱٪ و ۱۰٪ افزایش داده شد و کنتراست بین رطوبت اولیه ۰/۰۱٪ و رطوبتهای بعدی اندازه‌گیری شد. در شکل ۶ مقادیر کنتراست برای رطوبتهای مختلف، وقتی فاصله آشکارساز-چشمه از

به وضعیت مرجع است به صورت ذیل بیان می‌کنیم:

$$\text{Contrast}(\%) = \frac{C' - C}{C} \times 100 \quad (3)$$

که در کار حاضر C ، C' به ترتیب تالی F8 و یا F2 در دو وضعیت متفاوت می‌باشند.

در ابتدا چشمه (یک باریکه‌ی موازی از پرتوهای گاما با شعاع ۰/۲۵ cm) را روی دهانه آشکارساز در فاصله ۱ cm از سطح خاک قرار داده و تالی‌های F8 و F2 را برای دو چشمه مورد نظر در رطوبت اولیه ۰/۰۱٪ ثبت شدند که همان مقادیر C مشخص شده در رابطه ۳ می‌باشند.

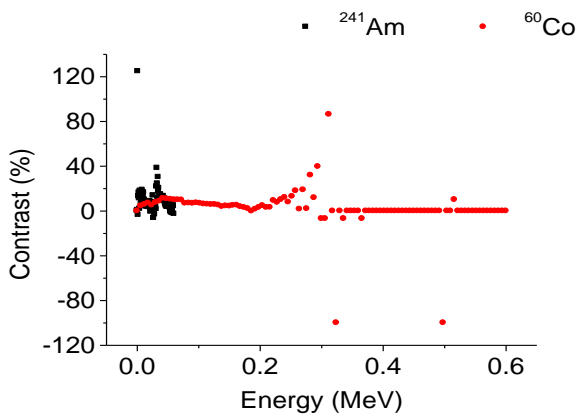


شکل ۱: نمودار مقایسه کنتراست مربوط به تالی F8 برحسب انرژی برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co . فاصله چشمه-آشکارساز سطح خاک ۱ cm.

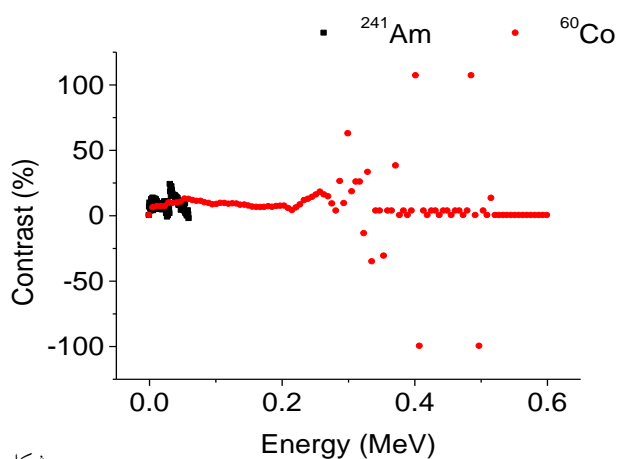
چشمه	نیمه عمر	انرژی (MeV)	احتمال %
^{60}Co	۵/۲۷۱ سال	۱/۱۷۳۲	۰/۴۹۹۹
		۱/۳۳۲۵	۰/۵۰۰۱
^{241}Am	۴۳۲/۲۰ سال	۰/۰۲۶۳۴	۰/۰۶۲۷
		۰/۰۳۳۲۰۵	۰/۰۰۳۴
		۰/۰۵۹۵۳۷	۰/۹۳۳۹

جدول ۲: مشخصات دو چشمه‌ی استفاده شده [۹]

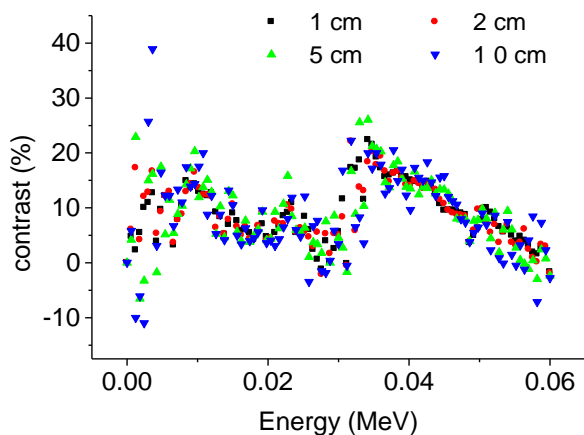
در مرحله بعد رطوبت را به ۱۰٪ رساندیم که در این حالت تالی‌های ثبت شده همان مقادیر C' در معادله ۳



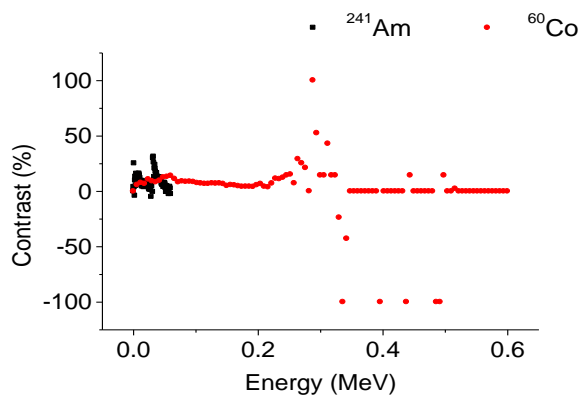
شکل ۴: نمودار مقایسه کنتراست مربوط به تالی F8 برحسب انرژی برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co . فاصله چشمه- آشکارساز سطح خاک ۱۰ cm



شکل ۲: نمودار مقایسه کنتراست مربوط به تالی F8 برحسب انرژی برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co . فاصله چشمه- آشکارساز سطح خاک ۲ cm



شکل ۵: نمودار کنتراست تالی F8 برحسب انرژی برای ^{241}Am با موازساز آشکارساز.



شکل ۳: نمودار مقایسه کنتراست مربوط به تالی F8 برحسب انرژی برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co . فاصله چشمه- آشکارساز سطح خاک ۵ cm

طرفی اندازه‌گیری رطوبت از روی پس‌پراکندگی پرتوی گاما به ما این امکان را می‌دهد که مستقیماً در محل مورد نظر مثل مزرعه اندازه‌گیری رطوبت انجام شود و نیازی به انتقال نمونه به آزمایشگاه نباشد.

مرجع‌ها

[۱] اشکرافت: فیزیک خاک کاربردی، انتشارات دانشگاه بو علی

سینا

[۲] Luiz F. Pires & et al, Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation, Soil and Tillage Research, Volume 82, Issue 1, Pages 89-97, May 2005

[۳] Necati Celik & Ugur Cevik, Monte Carlo determination of water concentration effect on gamma-ray detection efficiency in soil samples, Applied Radiation and Isotopes, Volume 68, Issue 6, Pages 1150-1153, June 2010

[۴] Jim Bilskie, Ph.D. Soil water status: content and potential, Campbell Scientific Inc, 2001

[۵] D. Demir & et al; "Determination of photon attenuation

coefficient, and field capacity of soil by gamma-ray transmission for 60, 356 and 662 keV gamma-ray"; Applied radiation and Isotopes 66, (2008) 1834-1837.

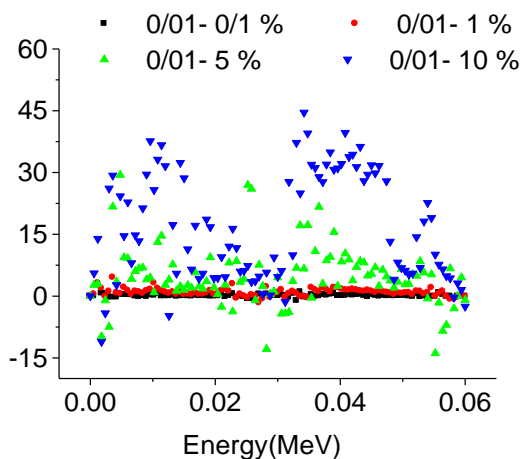
[۶] A. filiz Baytas & Sevgi Akbl; "Determination of soil parameters by gamma-ray transmission"; Radiation measurements 35, (2001) 17-21.

[۷] عباس آباد عربی، طاهره: محاسبه رطوبت خاک با استفاده از پرتوهای گاما به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، هفدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، اصفهان

[۸] توکلی عنبران، حسین: بررسی توانمندی روش پس‌پراکندگی فوتون-

های گاما در شناسایی مین‌های زمینی، پایان‌نامه دکترای فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۶

[۹] V. Osorio and H. Peraza, Physics section IAEA, Chart of the nuclides NUCHEART for windows, Version 1.2, Feb



شکل ۶: نمودار کنتراست تالی F8 برحسب انرژی بین رطوبت اولیه ۰/۰۱٪ و رطوبت‌های مشخص شده در شکل.

نتیجه‌گیری

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود مقدار کنتراست برای چشمه ^{241}Am هنگامی که فاصله چشمه-آشکارساز از سطح خاک ۱۰ cm است قله‌ی خوبی با مقدار تقریبی ۱۲۰٪ به وجود می‌آید. لذا در ادامه برای اندازه‌گیری رطوبت از روی پس‌پراکندگی پرتوهای گاما از سطح خاک، از چشمه کم انرژی ^{241}Am استفاده شده است. با توجه به رابطه دو با افزایش چگالی ماده احتمال پراکندگی کامپتون افزایش می‌یابد، در شکل ۳ نیز ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار رطوبت میزان کنتراست و تشخیص رطوبت توسط کد بیشتر شده است. با توجه به این تحقیق رطوبت از مقادیر خیلی کم تا مقادیر زیاد قابل تشخیص است و در نتیجه می‌توان از روش پس‌پراکندگی پرتوهای گاما از سطح خاک برای بدست آوردن رطوبت خاک با دقت بالا استفاده کرد. از



Shahrood University of Technology

Calculation of soil moisture content using gamma-rays and Monte Carlo simulation Method

Supervisor(s):

Dr. Hossein Tavakoli Anbaran

By:

Tahere Abbas Abad Arabi

Datae:2011

Abstract

Gamma rays mainly interact with the matter through three ways: photoelectric, Compton and pair production interactions that finally lead to absorbing and scattering rays from the material. Therefore in this study two methods of attenuation gamma rays and back scattering of the soil surface is used for the measuring of the moisture. Attenuation and scattering of gamma rays in the soil depend on beam energy, density and thickness in soil. If radiation energy and soil thickness don't change, main factor in attenuation and back scattering in the soil will be its thickness; and density depend on soil moisture. Then we can measure moisture from attenuating and back scattering gamma rays from soil.

MCNP-4C is multipurpose code that can be used for neutron, photon, electron transport. In this code all the gamma rays interactions with matter, such as coherent and incoherent scattering and absorption processes are simulated with the monte carlo modeling. In this work, first, with the monte carlo simulation was obtained the optimum situation for moisture measuring, and then was done related experiments.

In the measuring of the moisture with the attenuation, primarily, is simulating for some energies and moistures. After gaining good results, is performed same modeling for real sources in laboratory. Thereupon ^{60}Co is selected as the best source for experiments. Finally affection of the container soil was studied in attenuation soil.

In modulating through back scatter method with simulating, first, ^{241}Am is elected as the optimum source. In this process was introduced a quantity, is known contrast. And was saw that with the growing the moisture, contrast is increased linearly. Therefore we can use this was for moisture measuring. Also, it was gotten the optimum source and detector distance from soil with monte carlo modeling. Then with this results made related experiments. Finally, there were a good matching between monte carlo simulation and experiments.