مقاله پژوهشی

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱۳، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۱۰۳-۱۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

ارزیابی گلسنگ‌ها به‌عنوان شاخص زیستی تشخیص بریلیم-۷ تولیدشده از پرتوهای کیهانی

حسن رنجبر*، علی یوسفی و ایمان جانجانی

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

* تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، کدپستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵.

پست الکترونیکی: hranjbar@aeoi.org.ir

چکیده

یکی از نگرانی‌ها و دغدغه‌های دائمی در موضوع حفظ سلامت عموم، وجود عناصر رادیواکتیو و پرتوزا (پرتوزای طبیعی و پرتوزای مصنوعی) در محیط زیست و به طبع آن در مواد غذایی انسان و دام است. یکی از این مواد پرتوزای طبیعی با منشأ کیهانی بریلیم-۷ است که از برهمکنش پرتوهای کیهانی با هسته‌های نیتروژن و اکسیژن موجود در اتمسفر زمین تولید می‌شود. شاخص‌های زیستی موجوداتی زنده، مانند گیاهان هستند که آلودگی‌های زیستی مانند مواد رادیواکتیو و پرتوزا را به خود جذب کرده و امکان تشخیص آن آلودگی را دارا هستند. هدف از این تحقیق، ارزیابی گلسنگ به‌عنوان یک شاخص زیستی برای تشخیص بریلیم-۷ کیهان‌زاد است. بدین منظور با استفاده از روش طیف‌سنجی گاما مجهز به آشکارساز HPGe، میزان هستهٔ پرتوزا بریلیم-۷ کیهان‌زاد در ۱۵ گلسنگ مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که اکتیویته هستهٔ پرتوزا بریلیم-۷ در نمونه‌ها، در بازه ۴۲/۶ تا ۹۶/۵ بکرل و با میانگین ۶۸/۹ بکرل است. از نتایج می‌توان نتیجه گرفت که گلسنگ، ویژگی‌های یک شاخص زیستی برای ردیابی بریلیم-۷ را داشته و برای پایش عناصر رادیواکتیو در محیط زیست می‌توان از آن استفاده کرد.

کلیدواژگان: پرتوی کیهانی، بریلیم-۷، شاخص زیستی، طیف‌سنجی گاما.

۱. مقدمه

موضوع آلودگی محیط زیست یکی از مهمترین و پرچالش‌ترین مسائل ناشی از تمدن بشری در دنیای امروز به‌حساب می‌آید، در این‌باره عوامل مهمی در محیط اطراف وجود دارند که می‌توانند اثرات مخربی روی محیط زیست ما ایجاد کند. در حال حاضر با پیشرفت و ترقی تمدن انسانی و گسترش فن‌آوری و افزایش هرروزهٔ جمعیت، جهان با چالشی به نام آلودگی در هوا و زمین روبرو شده است که زندگی ساکنان کره زمین را مورد تهدید قرار داده است به‌طوری که حفاظت محیط زیست در تمام کشورهای جهان مورد توجه ویژه دولتمردان قرار گرفته است. آلودگی محیط زیست انواع مختلفی دارد که یکی از آن‌ها آلودگی پرتوی (رادیواکتیو) محیط زیست است [۱].

یکی از نگرانی‌ها و دغدغه‌های دائمی در موضوع حفظ سلامت عموم، وجود عناصر رادیواکتیو و پرتوزا (پرتوزای طبیعی و پرتوزای مصنوعی) در محیط زیست و به طبع آن در مواد غذایی انسان و دام است. به همین منظور حفاظت و مراقبت از سلامت و بهداشت مردم و محیط زیست، پس از اتفاقات و

حوادث هسته‌ای مانند سانحه فوکوشیمای ژاپن در سال ۲۰۱۱ و چرنوبیل در سال ۱۹۸٦ و حادثه تری مایل آیلند در سال ۱۹۷۹، بیش از پیش مورد توجه سازمان‌های بهداشت جهانی و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و ... قرار گرفت. زیرا مواد رادیواکتیو بیشتری را وارد جو کرد و سبب آلوده‌کردن خاک، گیاهان و محیط زیست گردید. مواد رادیواکتیو رفتار شیمیایی و فیزیکی شبیه مواد مغذی که توسط موجودات زنده جذب می‌شوند، دارند. از این رو گیاهان همان‌طور که برای رشد و نمو مواد مغذی مورد نیاز را جذب می‌کنند، مواد پرتوزا را جذب خواهند کرد. این جذب، به عواملی همچون میزان جذب عناصر مغذی و سایر مواد از خاک و آب و شرایط محیطی که گیاهان در آن شرایط رشد می‌کنند، مانند PH خاک، نوع خاک و رطوبت بستگی دارد [۲].

مواد پرتوزای طبیعی (NORM)[1] در تمام نقاط و مواد زمین در مقادیر و اکتیویته‌های مختلف وجود دارد. منشأ مواد پرتوزا و رادیواکتیو که به‌صورت طبیعی در محیط زیست وجود دارند شامل مواد پرتوزای اولیه مربوط به زمان تشکیل کره زمین با نیمه عمر طولانی مانند اورانیوم، توریم و پتاسیم و همچنین نوکلیدها یا هسته‌های پرتوزای کیهان‌زاد (موضوع این تحقیق) است. یکی از مواد پرتوزای طبیعی با منشأ کیهانی بریلیم-۷ [2] است.

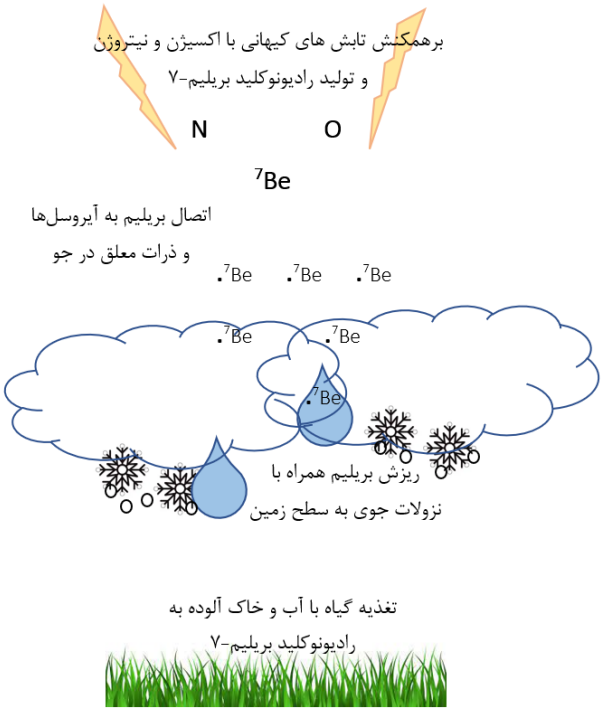
بریلیم-۷ یک ماده پرتوزای طبیعی کیهان‌زاد با نیمه‌عمر ۵۳/۳ روز است که از برهمکنش پرتوهای کیهانی با هسته‌های نیتروژن و اکسیژن موجود در اتمسفر زمین تولید می‌شود و به‌طور عمده با بارش‌های جوی (باران و برف) وارد محیط زیست می‌شود، درحالی‌که میزان آن از رسوب خشک (گرانش) کمتر از ۱۰ درصد است. اکتیویته بریلیم-۷ در اتمسفر بسته به موقعیت جغرافیایی، فعالیت خورشیدی، جابجایی توده‌های هوا در جو می‌تواند متغیر باشد. هنگامی‌که بریلیم-۷ از طریق بارش به سطح زمین می‌رسد، به‌طور مساوی پراکنده نمی‌شود و تمایل دارد که عمدتاً در گیاهان سطحی یا آبزی و به میزان کمتری در خاک سطحی قرار گیرد. در حال حاضر این رادیونوکلئید به‌طور مکرر برای مطالعات علمی مانند تغییرات آب و هوایی، میزان فرسایش خاک و شاخص‌های زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

پروتون + C-۱٤ ← تابش کیهانی + N-۱٤

پروتون + B-۱۳ ← تابش کیهانی + C-۱٤

پروتون + Be-۱۰ ← تابش کیهانی + B-۱۳

دو نوترون + Be-۷ ← پروتون + Be-۱۰



شکل (۱): طرح شماتیک از تولید بریلیم-۷ و نحوه جذب آن توسط شاخص‌های زیستی.

[1] Naturally Occurring Radioactive Materials

[2] Bryllium-7

شاخص‌های زیستی موجوداتی زنده مانند گیاهان هستند که آلودگی‌های زیستی مانند مواد رادیواکتیو و پرتوزا را به‌خود جذب کرده و امکان تشخیص آن آلودگی را داراست. از ویژگی‌های یک موجود زنده برای اطلاق شاخص زیستی، می‌توان به توانایی جذب آلاینده در خود، توزیع جغرافیایی گسترده، فراوانی زیاد، دسترسی همیشگی به آن، حساسیت زیاد به آلودگی مورد ارزیابی و... اشاره کرد. یکی از شاخص‌های زیستی که ویژگی‌های یک شاخص را داشته و امروزه جهت تشخیص و تعیین آلودگی‌های زیست‌محیطی از آن استفاده می‌شود گلسنگ است [٤].

گلسنگ‌ها موجوداتی با شکل پیچیده‌ای از زندگی هستند که از مشارکت و همزیستی دو ارگانیسم مجزا یعنی یک قارچ و یک جلبک تشکیل شده است. در این همزیستی شریک غالب قارچ است که اکثر خصوصیات گلسنگ از آن است. جلبک می‌تواند یک جلبک سبز یا یک جلبک سبز آبی باشد که به‌عنوان سیانوباکتری شناخته می‌شود. بسیاری از گلسنگ‌ها هر دو نوع جلبک را دارند.

با توجه به خصوصیات و ویژگی‌های مناسب، گلسنگ در مقایسه با گیاهان دیگر به‌عنوان یک شاخص زیستی شناخته می‌شود و امروزه در مطالعات علمی و تحقیقی آلاینده‌ها و محیط زیست مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. در تحقیقی که توسط اسکوترود[3] و همکارانش صورت گرفت هسته‌های پرتوزا سزیم-۱۳۷ و استرانسیم-۹۰ حاصل از حادثه چرنوبیل در گوشت اندام گوزن شمالی کشور نروژ مشاهده و گزارش گردید [۵]. در تحقیق دیگری که توسط دالوند[4] و همکارانش انجام شد تشخیص سزیم-۱۳۷ با استفاده از گلسنگ مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه گرفتند که این گیاه پتانسیل پایش زیستی برای سزیم-۱۳۷ را دارد [٦]. برتن[5] و همکارانش در تحقیقی با مقایسه میزان هسته‌های پرتوزا سزیم-۱۳۷ و استرانسیم-۹۰ در گلسنگ و گیاهان آوندی، به این نتیجه رسیدند که میزان این مواد پرتوزا در گلسنگ حدود دو برابر زیادتر از میزان آن در گیاهان آوندی است [۷]. در تحقیق دیگری که توسط گومز[6] و همکارانش بر روی هسته‌های پرتوزا ید-۱۲۹ و سزیم-۱۳۷ گلسنگ‌های کشور سوئد انجام شد (حاصل از حادثه چرنوبیل) گلسنگ به‌عنوان یک شاخص زیستی برای این هسته‌های پرتوزا مورد تأیید قرار گرفت [۸].

با توجه به تحقیقات ذکر شده و وجود پتانسیل شاخص زیستی در گلسنگ‌ها هدف از این تحقیق بررسی و ارزیابی گلسنگ به‌عنوان یک شاخص زیستی در تشخیص بریلیم-۷ تولیدشده از پرتوهای کیهانی است. بدین منظور با استفاده از روش طیف‌سنجی گاما، میزان هستهٔ پرتوزا بریلیم-۷ کیهان‌زاد در گلسنگ‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

۲. بخش تجربی

۱.۲. روش کار

طیف‌سنجی گاما تنها روش معمول اندازه‌گیری هستهٔ پرتوزا بریلیم-۷ به‌عنوان یک ماده پرتوزای طبیعی با منشأ کیهانی است. در این روش با توجه به ساطع شدن یک تابش گاما با انرژی ٤٧٧/٥ کیلوالکترون‌ولت وقتی بریلیم-۷ به لیتیم-۷ واپاشی می‌کند (در حالت برانگیخته) امکان اندازه‌گیری و آنالیز آن تابش گاما وجود خواهد داشت. یک سیستم طیف‌سنجی گامای معمولی شامل یک کریستال نیمه‌هادی به‌عنوان آشکارساز،

[3] Skuterud
[4] Dalvand
[5] Bretten
[6] Gómez

سیستم خنک‌کننده مکانیکی یا نیتروژن مایع در مخزن دوار، پیش‌تقویت‌کننده، منبع بایاس آشکارساز، تقویت‌کننده خطی، مبدل آنالوگ به دیجیتال(ADC)، تحلیل‌گر چند کاناله طیف (MCA) و یک کامپیوتر به‌عنوان دستگاه خروجی داده است. از آن‌جایی‌که انرژی پرتوی گامای ساطع‌شده از هستهٔ پرتوزا بریلیم-۷ نزدیک به انرژی گامای ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت موجود در شمارش زمینه طیف است، لذا آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا (HPGe) به‌دلیل قدرت تفکیک خوبی که دارد (رزولوشن بالا) مناسب این کار است و لذا در این تحقیق از سیستم طیف‌سنج گاما با آشکارساز HPGe ساخت شرکت اورتک با بازدهی نسبی ٤٠٪ و ولتاژ بایاس ۲/۵ کیلوولت، مجهز به نرم‌افزار آنالیز طیف Gamma ۲۰۰۰ استفاده شد. نرم‌افزار Gamma ۲۰۰۰ برای اندازه‌گیری سطح زیر منحنی فوتوپیک، از روش‌های مختلفی استفاده می‌کند. یکی از روش‌های معمول برای محاسبه سطح زیر منحنی فوتوپیک، روش تکنیک تکه‌بندی[7] است. در این روش، نرم‌افزار تعدادی تابع ریاضی را بر روی طیف وارد شده اعمال می‌کند و سعی می‌کند بهترین تطابق بین تابع‌ها و انحنای طیف را پیدا کند. پس از تطابق توابع ریاضی با انحنای طیف، مقادیر پارامترهای مربوطه (مانند موقعیت، پهنای باند و شدت) برای هر فوتوپیک تعیین می‌شود. با استفاده از این پارامترها، میزان سطح زیر منحنی فوتوپیک، یعنی مساحت زیر منحنی تابع ریاضی مربوط به آن فوتوپیک، محاسبه می‌شود.

برای شناسایی هسته‌های پرتوزا در نمونه‌های مجهول نیاز به انجام کالیبراسیون انرژی داریم. با انجام این‌کار ارتباط بین شماره هر کانال نمایش داده شده در نرم‌افزار و انرژی مربوط به آن مشخص می‌گردد. به همین منظور از یک چشمه نقطه‌ای یوروپیوم (Eu-۱۵۲) استفاده گردید. یوروپیوم دارای انرژی‌های گامای مختلفی در بازه ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوالکترون‌ولت است که تقریباً کل طیف انرژی مورد نیاز برای طیف‌سنجی گاما را پوشش می‌دهد و از این نظر ایده‌آل است. در انجام این کار چشمه نقطه‌ای یوروپیوم به مدت زمان معینی شمارش گردید. پیک‌های مناسب به‌صورت دستی و از طریق نرم‌افزار انتخاب شدند و از سربرگ کایبراسیون، انرژی‌های متناظر با پیک‌های انتخاب شده توسط کاربر وارد می‌شوند و پس از آن کلید کالیبراسیون زده می‌شود.

لازم به ذکر است که کالیبراسیون عرض پیک نیز در این مرحله و به‌صورت اتوماتیک و همزمان با کالیبراسیون انرژی انجام می‌گردد. با انجام این کار قادر خواهیم بود با استفاده از انرژی پیک مجهول و مقایسه آن با مراجع، هستهٔ پرتوزا مجهول را شناسایی کنیم. مرجع مورد اطمینان جهت مقایسه انرژی‌ها، جدول ایزوتوپ‌ها (TOI[8]) است.

به منظور بررسی وجود یا عدم وجود بریلیم-۷ در گلسنگ، تعداد ۳۰ گلسنگ از ۱۵ نقطه جمع‌آوری شد. به عبارتی دیگر از هر نمونه یک نمونه تکراری برداشته شد و سپس این نمونه‌ها برای اندازه‌گیری به آزمایشگاه نمونه‌سازی منتقل گردید.

نمونه‌سازی بر اساس استانداردهای ASTM صورت گرفت به این صورت که نمونه‌سازی شامل توزین نمونه‌ها قبل و بعد از خشک کردن، خشک کردن نمونه‌ها، خردایش، الک کردن و انتقال به ظروف استاندارد است. بر اساس استاندارد، دما بر روی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید و در طی ٢٤ ساعت نمونه‌ها خشک شدند. در مرحله بعد با استفاده از آسیاب عملیات خردایش صورت گرفت و برای یکنواختی نمونه، نمونه‌ها الک

[7] Peak Fitting

[8] Table of Isotopes

شده و سپس به ظروف استاندارد اندازه‌گیری منتقل شده و با ترازوی دقیق وزن شدند.

پس از نمونه‌سازی، برای اندازه‌گیری میزان و اکتیویته بریلیم-۷ در نمونه‌ها، عملیات شمارش آن‌ها به مدت ۲۰ ساعت انجام شد. محاسبه اکتیویته بریلیم با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود:

$$A = \frac{N_S - N_B}{\varepsilon.\gamma.m.t.K} \qquad (۱)$$

که پارامترهای به‌کار رفته در این فرمول عبارتند از:

A: اکتیویته یا میزان بریلیم-۷ بر حسب بکرل.

N_S: سطح زیر پیک در انرژی ٤٧٧/٥ کیلوالکترون‌ولت در طیف نمونه.

N_B: سطح زیر پیک در انرژی مورد نظر در طیف شمارش زمینه.

ε: بازده شمارش در انرژی مورد نظر.

γ: نسبت انشعاب که برای تابش گامای بریلیم-۷ در حدود ۱۰/٤ درصد است.

m: جرم نمونه.

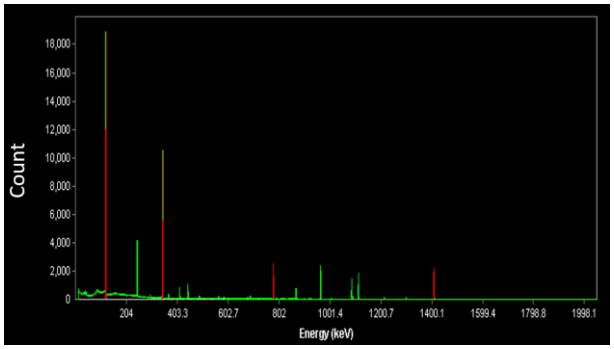
t: مدت زمان شمارش نمونه.

K: ضریب تصحیح برای پدیده‌های خودجذبی، واپاشی حین شمارش، زمان مرده، هم‌فرودی واقعی و تجمیع تصادفی شمارش‌ها[9].

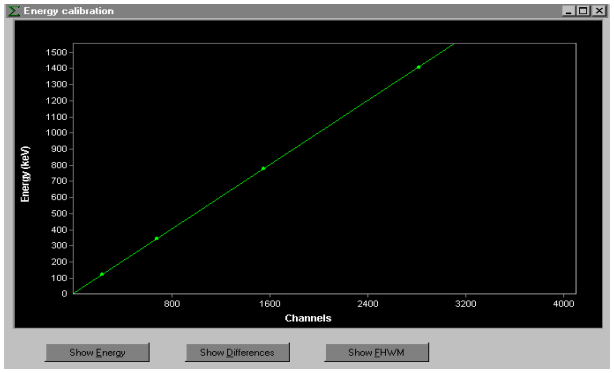
پس از شمارش نمونه‌ها به مدت زمان کافی سطح زیر منحنی پیک و زمان شمارش از خروجی نرم‌افزار استخراج می‌گردد. با استفاده از منحنی کالیبراسیون بازده، بازده در انرژی‌های مورد نظر به‌دست می‌آید. نسبت انشعاب[10] نیز از مراجعی نظیر جدول ایزوتوپ‌ها یا نرم‌افزار Raddecay قرائت شده و جرم نمونه نیز توسط وزن کردن به‌دست می‌آید. با داشتن تمامی پارامترهای معادله فوق امکان محاسبه اکتیویته هستهٔ پرتوزا فراهم می‌شود.

۳. نتایج و بحث

شکل‌های ۲ و ۳، طیف حاصل شده از چشمه نقطه‌ای و منحنی کالیبراسیون انرژی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): طیف حاصل شده از چشمه نقطه‌ای یوروپیوم.

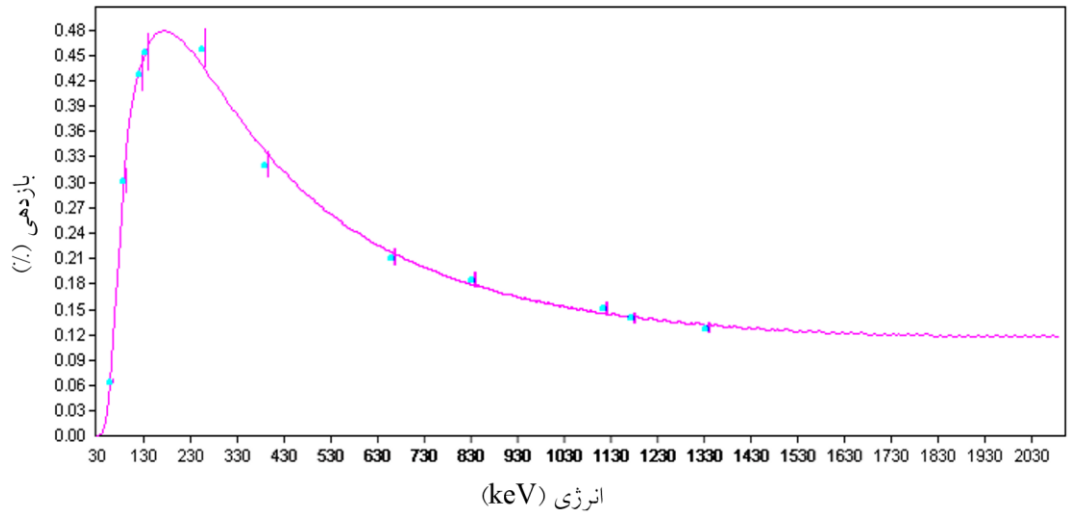


شکل (۳): انرژی بر حسب شماره کانال (کالیبراسیون انرژی).

شکل ٤ منحنی کالیبراسیون بازده را نشان می‌دهد که در این کار با استفاده از نمونه‌های استاندارد قابل ردیابی (CRM11) تولید شده توسط شرکت پل‌اتم۱۲ لهستان، به‌دست آمده است. روش کار در انجام کالیبراسیون بازده دستگاه بر اساس استاندارد E-181 از مجموعه استانداردهای ASTM [۹] و همچنین سند ANSI-42 صورت گرفته است [۱۰].

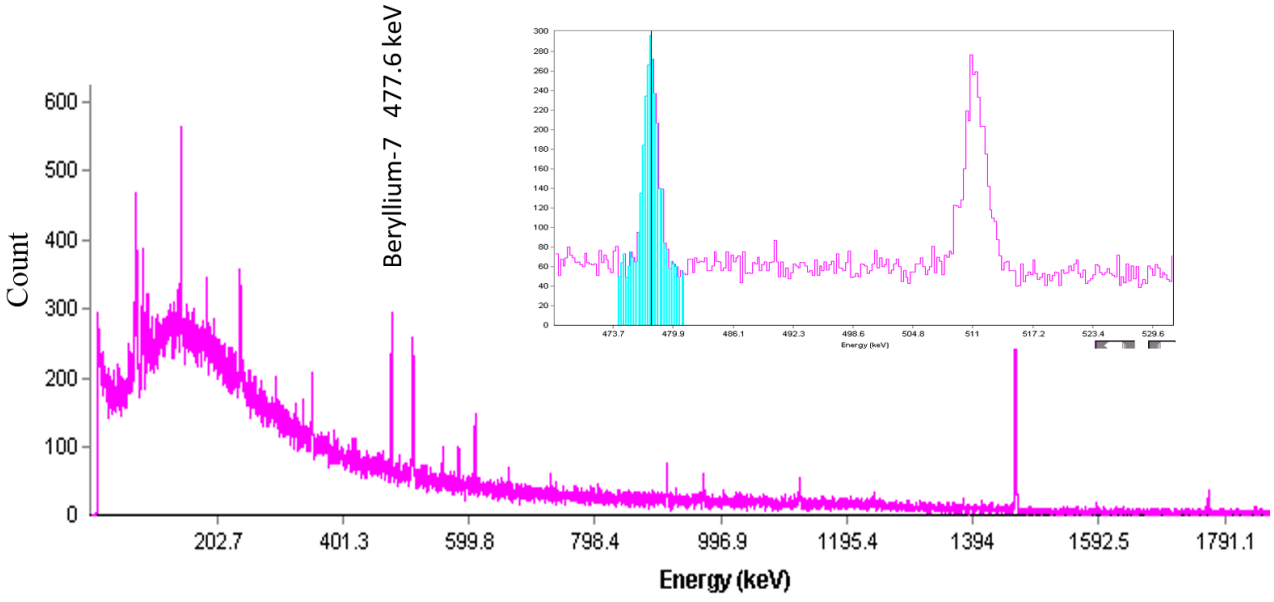
[9] Random Summing
[10] Branching Ratio

[11] Certified Reference Material
[12] POLATOM



شکل (٤): منحنی کالیبراسیون بازده برای نمونه خاک.

شکل ۵ طیف گامای یک نمونه را نشان می‌دهد که به مدت ۲۰ ساعت با آشکارساز ژرمانیم فوق خالص ساخت شرکت اورتک و با بازدهی ٤۰ درصد اندازه‌گیری شده است. برای تشخیص بریلیم-۷ موجود در نمونه‌ها، پیش از شمارش، کالیبراسیون انرژی دستگاه با چشمه استاندارد یوروپیم-۱۵۲ انجام شد. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، فوتوپیک ٤۷۷/٦ کیلوالکترون‌ولت مربوط به پرتوی گامای بریلیم-۷ به وضوح در نمونه دیده می‌شود. پیک مربوط به هستهٔ پرتوزا بریلیم-۷ که بزرگنمایی و با رنگ آبی برجسته شده است در نمونه‌های مختلف دارای اندازه و شدت متفاوت است که نشان‌دهنده میزان متفاوت بریلیم-۷ در آن‌هاست. در نمونه‌ها علاوه بر پیک بریلیم-۷ و پیک ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت (مربوط به پدیده نابودی زوج)، پیک‌های دیگری نیز دیده می‌شود که مربوط به حضور مواد پرتوزای طبیعی از زنجیره واپاشی اورانیوم و توریم در آن نمونه است.



شکل (۵): طیف پرتوی گامای یک نمونه گلسنگ با استفاده از طیف‌سنج گامای مجهز به آشکارساز HPGe.

پس از شمارش همه نمونه‌ها و استخراج میزان سطح زیر منحنی پیک ٤٧٧/٦ کیلوالکترون‌ولت از خروجی نرم‌افزار، فعالیت یا اکتیویته بریلیم-۷ نمونه‌ها با استفاده از معادله (۱) به‌دست آمد (جدول ۱). مقادیر گزارش‌شده برای هر نمونه از میانگین اکتیویته به‌دست آمده از دو نمونه مشابه و تکراری به‌دست آمده است.

همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است در همه نمونه‌ها بریلیم-۷ آشکار شده است. میزان اکتیویته این هستهٔ پرتوزا در بازه ٤٢/٦ تا ٩٦/٥ بکرل با میانگین ٦٨/٩ بکرل اندازه‌گیری شد.

جدول (۱): میزان فعالیت بریلیم-۷ نمونه‌های گلسنگ.

ردیف	شناسه نمونه	فعالیت بریلیم-۷ (بکرل)
۱	نمونه گلسنگ-۱	٥٦/٤ ± ٣/١
۲	نمونه گلسنگ-۲	٦٥/٨ ± ٣/٦
۳	نمونه گلسنگ-۳	٤٩/٩ ± ٢/٧
٤	نمونه گلسنگ-٤	٦٣/٣ ± ٣/٤
٥	نمونه گلسنگ-٥	٧٤/٢ ± ٤/٠
٦	نمونه گلسنگ-٦	٤٨/٣ ± ٢/٦
۷	نمونه گلسنگ-۷	٧٩/٨ ± ٤/٣
۸	نمونه گلسنگ-۸	٦٥/١ ± ٣/٥
۹	نمونه گلسنگ-۹	٤٢/٦ ± ٢/٣
۱۰	نمونه گلسنگ-۱۰	٨١/٢ ± ٤/٤
۱۱	نمونه گلسنگ-۱۱	٧٢/١ ± ٣/٩
۱۲	نمونه گلسنگ-۱۲	٩٦/٥ ± ٤/٨
۱۳	نمونه گلسنگ-۱۳	٧٤/٨ ± ٤/١
١٤	نمونه گلسنگ-١٤	٦٩/٣ ± ٣/٧
١٥	نمونه گلسنگ-١٥	٩٣/٨ ± ٤/٩
١٦	میانگین	٦٨/٩
١٧	انحراف معیار[13] (σ)	١٥/١
١٨	خطای استاندارد[14]	٣/٩

انحراف معیار به‌عنوان یک شاخص آماری، متغیری است که میزان تغییرات داده‌های یک جمعیت یا یک نمونه نسبت به میانگین آن داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. انحراف معیار بیان‌گر توزیع داده‌ها اطراف میانگین آن‌هاست. هرچه مقدار انحراف معیار کمتر باشد، نشان می‌دهد که داده‌ها به‌طور نزدیک‌تری در اطراف میانگین خود توزیع شده‌اند و برعکس هر چه مقدار انحراف معیار بیشتر باشد نشان‌دهنده تفاوت‌های بیشتر داده‌ها نسبت به میانگین خواهد بود. برای محاسبه انحراف معیار (معادله ۲) ابتدا میانگین داده‌ها حساب می‌شود و سپس فاصله هر داده از این میانگین محاسبه شده و مربع این فاصله‌ها متوسط گرفته می‌شود که جذر این متوسط، انحراف معیار داده‌هاست. همچنین برای محاسبه خطا (Standard Error) اگر انحراف معیار را بر ریشه دوم تعداد داده‌ها تقسیم کنیم مقدار خطا به‌دست می‌آید.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}} \qquad (۲)$$

$$\text{Standard Error} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \qquad (۳)$$

با توجه به فعالیت انجام شده و نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، گلسنگ می‌تواند به‌عنوان یک شاخص زیستی ایده‌آل برای تشخیص بریلیم-۷ که از برهمکنش تابش‌های کیهانی با عناصر موجود در جو زمین تولید می‌شود در نظر گرفته شود. زیرا گلسنگ‌ها گیاهانی با عمر زیاد هستند و چون سرعت رشد کوتاهی دارند با مرور زمان مورفولوژی خود را حفظ می‌کنند و از طرف دیگر شدیداً به عناصر غذایی جوی وابستگی دارند و به خاطر نداشتن کوتیکول و سیستم روزنه‌ای قادرند عناصر دیگر (آلاینده‌ها) را در تمام سطوح خود جذب کنند. از ویژگی‌های مناسب دیگر گلسنگ‌ها که سبب گرفتن نتیجه می‌شود (که آن‌ها را می‌توان به‌عنوان شاخص در نظر گرفت)، این است که برای نمونه‌برداری از گلسنگ‌ها هیچ‌گونه محدودیت زمانی وجود ندارد؛ یعنی در هر زمانی از طول سال می‌توان از گلسنگ‌ها نمونه‌برداری کرد. چون تغییر

[13] Standard Deviation
[14] Standard Error

فصول بر مورفولوژی آن‌ها اثرات محدودی می‌گذارد و بنابراین در طولانی‌مدت هسته‌های پرتوزا قابل انباشت در آن‌ها هستند. همچنین هزینه نمونه‌سازی آن برای آنالیز و اندازه‌گیری رادیواکتیویته کم است. چون نیاز به جداسازی و فرآیندهای رادیوشیمیایی برای آنالیز بریلیم-۷ در نمونه‌ها نیست. علاوه‌بر آن‌ها گلسنگ‌ها، نسبت به شرایط آب و هوا، تنش‌های محیطی، خشکی و دیگر شرایط جوی مقاومت زیادی دارند. این ویژگی‌ها و نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق در مورد وجود هستهٔ پرتوزا بریلیم-۷ در گلسنگ‌ها و همچنین نتایج تحقیقات دیگران که در جدول ۲ به آن اشاره شده است، نشان می‌دهد از گلسنگ‌ها به منظور بررسی و پایش محیطی آلودگی زیست محیطی هستهٔ پرتوزا کیهان‌زاد بریلیم-۷ می‌توان استفاده کرد.

جدول (۲): میزان فعالیت بریلیم-۷ گزارش‌شده در گلسنگ این تحقیق و تحقیقات دیگران (با استفاده از روش اسپکترومتری گاما).

ردیف	شاخص زیستی	فعالیت بریلیم-۷	موقعیت	مرجع
۱	گلسنگ	٦٨	فرانسه	Kirchner [۱۱]
۲	گلسنگ	۲٦٨	صربستان	Krmar [۱۲]
۳	گلسنگ	۲۷۷	روسیه	Ramzaev [۱۳]
٤	گلسنگ	٦٨/۹	ایران	کار حاضر

نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد میزان بریلیم-۷ در نمونه‌های گلسنگ متفاوت هستند. اکتیویته بالاتر در نمونه‌ها ممکن است مرتبط با مقدار بارش بیشتر در ارتفاعات باشد که باعث انتقال بیشتر بریلیم-۷ از طریق بارش‌ها می‌شود. از نظر قابلیت تشخیص بریلیم-۷، تمام انواع گلسنگ قابل استفاده نیستند. برخی از گونه‌های گلسنگ، به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود، بهترین قابلیت برای تشخیص بریلیم-۷ را دارند. برای تشخیص بریلیم-۷، گونه‌های زانتوریا، ریزوکارپون و پارملیا معمولاً به‌عنوان گزینه‌های مناسب در نظر گرفته می‌شوند.

تفاوت معنی‌داری بین تکرارهای هر نقطه مشاهده نشد که نشان می‌دهد که اندازه‌گیری‌ها تکرارپذیر بوده و قابل اعتمادند. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گلسنگ را به‌عنوان شاخص زیستی مناسب برای بریلیم-۷ کیهانی در ایران توصیه کرد. البته برای قضاوت قطعی به مطالعات بیشتر در مقیاس ملی احتیاج است.

٤. نتیجه‌گیری

آلودگی‌های پرتوی (عناصر رادیواکتیو) موجود در محیط زیست سبب آسیب به اکوسیستم به‌طور آهسته و پیوسته و ایجاد تغییر در کیفیت آن و در نهایت به خطر انداختن حیات موجودات زنده می‌شود. در نتیجه پایش محیطی به منظور ارزیابی و اندازه‌گیری این آلاینده‌ها امری لازم و ضروری است. امروزه استفاده از روش‌های جدید که هم بازدهی بیشتری داشته باشد و هم نیاز به نیروی انسانی، زمان و هزینه پایین‌تری نسبت به روش‌های دیگر داشته باشد مورد توجه محققان قرار گرفته است. همان‌طور که از نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت، یکی از روش‌های پایش و تشخیص هستهٔ پرتوزا بریلیم-۷ که محصول برهمکنش تابش‌های کیهانی فضا با اکسیژن و نیتروژن جو زمین است استفاده از موجود زنده‌ای به نام گلسنگ است که با جذب و انباشت این هستهٔ پرتوزا در خود به‌عنوان یک شاخص زیستی تشخیص هستهٔ پرتوزا کیهان‌زاد بریلیم-۷ که از آلاینده‌های پرتوزای طبیعی است عمل می‌کند و به‌طور وسیعی برای پایش عناصر رادیواکتیو در محیط زیست قابل بهره‌برداری و استفاده است. تاکنون مطالعات متعددی در سایر کشورها نیز درباره استفاده از گلسنگ به‌عنوان شاخص زیستی (علاوه‌بر بریلیم-۷) انجام شده است. در اروپا و آمریکای شمالی، گلسنگ‌ها به‌طور گسترده‌ای برای سنجش آلودگی‌های صنعتی مانند سرب، سدیم، سولفات و فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در چین، گلسنگ به‌عنوان شاخصی برای پایش آلاینده‌هایی نظیر SO_2، NO_2 و ذرات معلق در هوا مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعاتی در استرالیا و نیوزلند نشان داده است که گلسنگ می‌تواند برای کنترل آلودگی‌های هوا و تعیین پتانسیل بیولوژیکی خاک مفید باشد. در اسکاندیناوی و کانادا نیز از گلسنگ برای پایش آلودگی‌های رادیواکتیو و هوا به‌طور گسترده حمایت شده است. وجود این مطالعات متعدد نشان از توانایی و کاربردپذیری گسترده گلسنگ به‌عنوان یک شاخص زیست‌محیطی دارد.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی صمیمانه خود را از رئیس و پرسنل آزمایشگاه مرکزی و آزمایشگاه شناسایی و مشخصه‌یابی رادیونوکلیدهای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

٦. مراجع

1. X. Li, F. Zhang, Y. He, C. O. Delang, Mingyi Yang. Variations of 7Be concentration in plants and its significance for 7Be in soil on the Loess Plateau, China: Based on three-year monitoring data. *Plant Soil* 477 (2022) 725-741.
2. A. Burakowska, M. Kubicki, B. Mysłek-Laurikainen, M. Piotrowski, H. Trzaskowska, R. Sosnowiec. Concentration of 7Be, 210Pb, 40K, 137Cs, 134Cs radionuclides in the ground layer of the atmosphere in the polar (Hornsund, Spitsbergen) and mid-latitudes (Otwock-Świder, Poland) regions. *J. Environ. Radioactivity* 240 (2021) 106739.
3. L. Jiwen, V. N. Starovoitova, D. P. Wells. Long-term variations in the surface air 7Be concentration and climatic changes. *J. Environ. Radioactivity* 116 (2013) 42-47.
4. M. Manzoor, K. A. Bhat, N. Khurshid, A. M. Yatoo, Z. Zaheen, S. Ali, M. N. Ali, I. Amin, M. U. R. Mir, S. M. Rashid, M. U. Rehman. Bio-indicator species and their role in monitoring water pollution. In: G. H. Dar, K. H. Hakeem, M. A. Mehmood, H. Qadri (eds) Freshwater Pollution and Aquatic Ecosystems. Apple Academic Press, New York, pp 321-347, 2021.
5. L. Skuterud, J. P. Gwynn, E. Gaare, E. Steinnes, K. Hove. 90Sr, 210Po and 210Pb in lichen and reindeer in Norway. *J. Environ. Radioactivity* 84 (2005) 441-456.
6. A. Dalvand, A. Jahangiri, J. Iranmanesh. Introduce lichen Lepraria incana as biomonitor of Cesium-137 from Ramsar, northern Iran. *J. Environ. Radioactivity* 160 (2016) 36-41.
7. S. Bretten, E. Gaare, T. Skogland, E. Steinnes. Investigations of radiocaesium in the natural terrestrial environment in Norway following the Chernobyl accident. *Analyst* 117 (1992) 501-503.
8. J. M. Gómez-Guzmán, J. M. López-Gutiérrez, E. Holm, A. R. Pinto-Gómez. Level and origin of 129I and 137Cs in lichen samples (Cladonia alpestris) in central Sweden. *J. Environ. Radioactivity* 102 (2011) 200-205.
9. ASTM E181-17 - American Standard Test Methods Committee. Standard Test Methods for Detector Calibration and Analysis of Radionuclides, 2017.
10. ANSI N42.14-1999 - American National Standard for Calibration and Use of Germanium Spectrometers for the Measurement of Gamma-Ray Emission Rates of Radionuclides,1999.
11. G. Kirchner, O. Daillant. The potential of lichens as long-term biomonitors of natural and artificial radionuclides. *Environ. Pollution* 120 (2002) 145-150.
12. M. Krmar, D. Radnović, D. T. Mihailović, B. Lalić, J. Slivka, I. Bikit. Temporal variations of 7Be, 210Pb and 137Cs in moss samples over 14-month period. *Appl. Radiat. Isot*. 67 (2009) 1139-1147.
13. V. Ramzaev, A. Barkovsky, A. Gromov, S. Ivanov, M. Kaduka. Epiphytic fruticose lichens as biomonitors for retrospective evaluation of the 134Cs/137Cs ratio in Fukushima fallout. *J. Environ. Radioactivity* 138 (2014) 177-185.