

بررسی امکان استفاده از آشکارساز گازی میکرو نواری به عنوان آشکارساز رادن جهت پیش‌بینی زلزله

پروین دهقانی پور^{۱*}، جمشید سلطانی نبی پور^۲، مهدی سهرابی^۳، محمدرضا رضایی راثینی نژاد^۴ و سیدعلی هاشمی زاده عقدا^۱

^۱گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران

^۲گروه پرتو پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، تهران، ایران.

^۳دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

^۴گروه مهندسی هسته ای، دانشکده علوم و فناوری نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

*کرمان، سیرجان، دانشگاه پیام نور، گروه فیزیک، کد پستی: ۵۸۳۳۳-۷۸۱۶۸

پست الکترونیکی: physdpd@gmail.com

چکیده

در دهه‌های گذشته، طی مطالعات متعددی به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت گاز رادن در خاک یا آب‌های زیرزمینی می‌تواند نشانه‌ای از زلزله قریب الوقوع باشد. اعتقاد بر این است که در صورت بروز حرکات ناگهانی سنگ‌ها قبل از زلزله این گاز از عمق زمین خارج شده و به سطح می‌رسد. به این ترتیب با اندازه‌گیری میزان تغییرات غلظت این گاز امکان پیش‌بینی زلزله وجود دارد. در اینجا به منظور امکان‌سنجی استفاده از آشکارساز گازی میکرو نواری در مونیتورینگ تغییرات گاز رادن، در ابتدا برای راستی‌آزمایی کد، برد ذره آلفای رادن و دختران آن در هوا در شرایط استاندارد بدست آمده است که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد سپس هندسه آشکارساز توسط کد MCNPX شبیه‌سازی شده و پس از بررسی میانگین پاسخ آشکارساز به یک واپاشی، خروجی کد با توجه به اطلاعات مربوط به تغییرات رادن در چشمه‌های آبگرم جوشان کالیبره شده است. مشاهده نتایج نشان می‌دهد که پاسخ آشکارساز نسبت به داده‌های تجربی قابل مقایسه است و می‌توان از آن به عنوان پیش‌نشانگر زلزله استفاده کرد.

کلیدواژه‌گان: آشکارساز میکرو نواری، رادن، زلزله، مونت کارلو، MCNPX

۱. مقدمه

روز که ذرات آلفا با انرژی $5/49\text{MeV}$ گسیل می‌کند. محصولات واپاشی آن، ^{218}Po و ^{214}Po نیز ذرات آلفا با انرژی 6MeV و $7/69\text{MeV}$ گسیل می‌کنند. رادن با دیگر عناصر و

گاز رادن یکی از مهمترین عناصر رادیواکتیو است که محصول واپاشی سری اورانیوم ^{238}U و رادیوم طبیعی موجود در زمین می‌باشد. گازی بی اثر، بی بو و بی رنگ با نیمه‌عمر تقریباً $3/8$

یک آشکارساز تناسبی گازی است که در سال ۱۹۸۸ توسط آنتوان اود معرفی شد [۹] و به خاطر ویژگی‌هایی چون قابلیت سرعت بالا و تفکیک خوب انرژی [۱۰] و هزینه کم نسبت به دیگر آشکارسازهای گازی مورد توجه محققان بوده است.

با توجه به ویژگی‌های ذکر شده هدف اصلی در این مقاله بررسی امکان استفاده از آشکارساز گازی میکرونواری در اندازه‌گیری غلظت گاز رادن به‌عنوان وسیله‌ای کارآمد جهت پیش‌بینی زلزله در مقیاس وسیع می‌باشد. در اینجا برای بررسی پاسخ آشکارساز جهت مونیتورینگ گاز رادن، در حالت اکتیو به بالای رادن، انرژی بجامانده ذره آلفای گسیل شده ناشی از واپاشی رادن و دختران آن با استفاده از کد MCNPX^۱ در نقاط مختلف درون حجم فعال آشکارساز بدست آمده و در نهایت خروجی کد با توجه به اطلاعات مربوط به تغییرات رادن در چشمه‌های آبگرم جوشان [۱۱] کالیبره شده است.

۲. مواد و روش‌ها

شکل ۱ نمونه‌ای از آشکارساز گازی میکرونواری متشکل از نوارهای آند و کاتد مسی بر روی بستر شیشه‌ای را نشان می‌دهد. عرض آن‌ها در حدود ۱۰ میکرون و پهنای کاتد ۱۰۰ میکرون است. فاصله بین نوارهای آند و کاتد به کمتر از ۱۰۰ میکرون و گام بین نوارهای یکسان حدود ۳۰۰ میکرون در نظر گرفته شده است. الکتروود صفحه رانشی یک ورق مایلر آلومینیومی است که در فاصله ۳ میلیمتری بالای صفحه میکرونواری قرار می‌گیرد و ناحیه رانش را می‌سازد که با گاز P₁₀ (ترکیب آرگون با ده درصد متان) پر شده است. هوای رادن‌دار درون محفظه‌ای به ارتفاع ۳ سانتیمتر بالای صفحه مایلر قرار دارد که آلفاهای ساطع شده از رادن و دختران از این صفحه وارد آشکارساز می‌شود.

ترکیبات شیمیایی ترکیب نمی‌شود و بخش اعظم این گاز در داخل سنگ‌های زمین باقی می‌ماند. غلظت گاز رادن در خاک‌های پوشاننده گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در سنگ‌ها معمولاً بیشتر است. با توجه به نیمه عمر رادن، کسری از گاز تولید شده در اثر واپاشی در درون خاک می‌تواند فاصله‌ی طولانی را طی کرده و به سطح زمین رسیده و وارد آب و اتمسفر شود. یکی از کاربردهای تعیین غلظت گاز رادن پیش‌بینی زلزله، گسل‌های فعال و کشف اورانیوم است. در مواردی قبل از وقوع زمین‌لرزه غلظت رادن در هوا و آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است. دلیل آن را تجمع انرژی در سنگ‌ها و ایجاد شکستگی‌ها دانسته‌اند و غلظت آن در محدوده‌ی گسل‌های فعال بالا می‌رود و از شکستگی‌ها می‌تواند گاز رادن خارج شود. تغییرات غلظت رادن و دیگر گازها در خاک قبل و بعد از زلزله به‌طور گسترده‌ای گزارش شده است [۵-۱]. از این رو بررسی غلظت غیرعادی رادن به‌عنوان یک پیش‌نشانگر زلزله از اهمیت زیادی برخوردار است. اولین تغییر غلظت گاز رادن درون آب‌های معدنی، توسط اولموف و ماواشیف، بعد از وقوع زمین‌لرزه‌ی سال ۱۹۶۶ تاشکند، پایتخت ازبکستان، ثبت شد که در آن افزایش غلظت از ۱۵ تا ۲۰۰ درصد در حدود ۳ تا ۱۳ روز قبل از زلزله دیده شده بود [۱].

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری غلظت رادن و دختران آن در طول سال‌ها به‌کار رفته است [۶]. یکی از این تکنیک‌ها، طیف‌سنجی پرتوهای آلفای گسیل شده از رادن و دختران آن توسط آشکارسازهای گازی است [۷]. آشکارسازهای تناسبی گازی که به انرژی ذره فرودی حساس می‌باشند، با طیف‌سنجی انواع تابش‌ها را بر اساس شکل پالسی که ایجاد می‌کنند از هم تشخیص می‌دهند بنابراین برای مشاهده آلفاهای ساطع شده از رادن و دختران آن مناسبند. اولین بار عملکرد آشکارساز تناسبی گازی رادن نوع سیمی جهت پیش‌بینی زلزله توسط چارپاک در سال ۲۰۱۰ بررسی گردید [۸]. آشکارساز گازی میکرونواری نیز

¹ Monte Carlo N-Particle eXtended (general-purpose Monte Carlo radiation transport code)

میکرو نواری است که از ۱ میکرومتر بالای نوارها تا فاصله ۱۰۰ میکرومتر از آن‌ها در نظر گرفته شده است [۱۲].

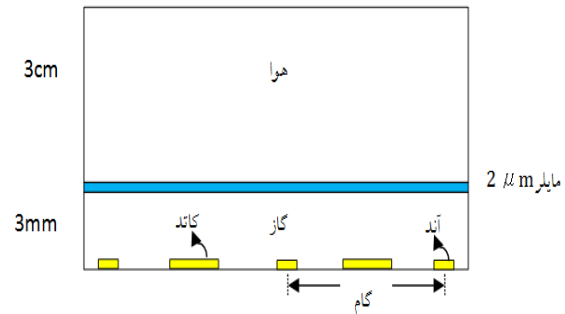
مقدار کل بار جمع‌آوری شده روی نوارها برابر است با:

$Q = nea$ که در آن n تعداد جفت یون‌های تولید شده، e بار الکترون و a ضریب تکثیر الکترون می‌باشد. برای پیدا کردن تعداد جفت یون‌های تولید شده در این ناحیه از فرمول $n = E/w$ استفاده شده که در آن w متوسط انرژی یونیزاسیون برای تولید یک جفت یون و E مقدار انرژی بجامانده در این ناحیه می‌باشد که با استفاده از کارت مش‌تالی کد بدست آمده است. مقدار w بستگی به نوع گاز دارد که در اینجا برای گاز p^{10} در شرایط فشار و دمای متعارف (فشار ۱ اتمسفر و دمای ۲۰ درجه سلسیوس) برابر 26.2 الکترون‌ولت است [۱۳].

۳. نتایج و بحث

۳.۱. صحت‌سنجی کد

جهت صحت‌سنجی کد برد ذرات آلفای رادن و دختران آن را در هوا بدست آورده و با مراجع مختلف مقایسه می‌شود. به این منظور هوای رادن‌دار تحت شرایط استاندارد دما و فشار (دمای صفر درجه سانتیگراد و فشار یک اتمسفر) به داخل حجم فعال آشکارساز وارد شده و ذرات آلفای ناشی از واپاشی رادن و دختران آن با مولکول‌های هوا برخورد کرده و در طول مسیر انرژی از دست داده و متوقف می‌شوند. تغییرات انرژی بجامانده برای یک ذره آلفای رادن با انرژی 5.49MeV در واحد طول برحسب فاصله طی شده محاسبه شده است (شکل ۲).



شکل (۱): نمونه ای از آشکارساز گازی میکرو نواری جهت آشکارسازی رادن

ذرات عبوری مولکول‌ها را در حجم گاز یونیزه کرده و جفت یون‌ها را تولید می‌کند. میدان الکتریکی در سرتاسر حجم گاز باعث می‌شود الکترون‌های تولید شده به سمت آند و یون‌های مثبت به سمت کاتد رانده شوند. نزدیک به نوارهای آند میدان الکتریکی بسیار قوی است به طوری که هر الکترون آزاد باعث تکثیر الکترون‌های آزاد اضافی می‌شود که می‌تواند با الکترونیک‌های حساس شناسایی شود. به طور کلی ارتفاع سیگنال روی نوارهای آند متناسب است با کاهش انرژی ذره در گاز. در ابتدا برای راستی آزمایی کد، برد ذره آلفای ^{222}Rn در هوا در شرایط استاندارد بدست آمده و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. سپس انرژی از دست رفته در واحد طول و برد آلفاهای رادن و دختران آن اندازه‌گیری شده است که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. پس از صحت‌سنجی، هندسه آشکارساز با استفاده از کد MCNPX شبیه‌سازی شده و تعداد جفت یون‌های تولید شده در این ناحیه بدست آمده و در نهایت خروجی کد کالیبره شده است. در حالت پرتوزایی بالا، تعداد 10^7 ذره آلفای مربوط به رادن و دختران آن در نظر گرفته شده که به صورت رندم در حجم محفظه هوا قرار دارند و هر کدام به صورت تصادفی تحت زوایا و انرژی‌های مختلف وارد حجم فعال آشکارساز شده و انرژی به‌جا می‌گذارند. در این حالت همگی نوارها به هم متصل و یک سیگنال دریافت می‌شود. تمرکز ما بر روی ناحیه تکثیر گاز در آشکارساز

$$R(E) = 3.8E^{1.5} + 1.55E^{1.5} + 0.18E^2 + 0.037E^3$$

[۱۶] برابر با $4/0.39 \text{ cm}$ و درصد خطا $4/34\%$ می باشد.

تحت شرایط ذکر شده، کاهش انرژی و برد ذره آلفای ناشی از واپاشی رادن (5/49 MeV) و دختران رادن، پلونیوم ۲۱۸ (6 MeV) و پلونیوم ۲۱۴ (7/69 MeV) در دما و فشار استاندارد به صورت جداگانه بدست آمده و در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): مقایسه برد ذره آلفای بدست آمده ناشی از واپاشی رادن، پلونیوم ۲۱۸ و پلونیوم ۲۱۴ در دما و فشار استاندارد با نتایج

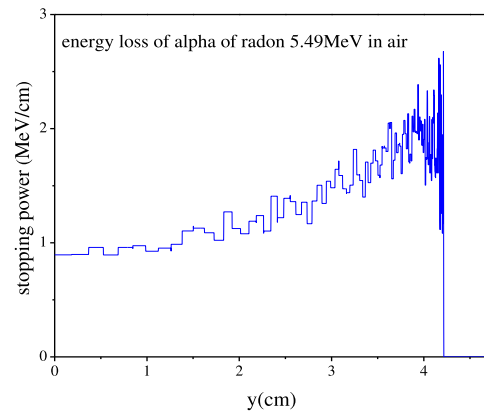
تجربی [۱۷ و ۱۸]

انرژی (MeV)	برد (cm)	dE/dx	برد	برد	
(MeV)	(cm)		[۱۷]	[۱۸]	
5/49	4/2145	0/8943	4/19	4/08	^{222}Rn
6	4/8085	0/84402	4/82	4/67	^{218}Po
7/69	7/1305	0/7054	6/90	6/91	^{214}Po

مقایسه نتایج نشان می دهد که برد بدست آمده ناشی از اجرای برنامه ورودی مونت کارلو با نتایج عملی همخوانی خوبی داشته و صحت کد تایید می گردد. بعد از صحت سنجی به محاسبه پاسخ آشکارساز میکرونواری به رادن موجود در هوا پرداخته می شود.

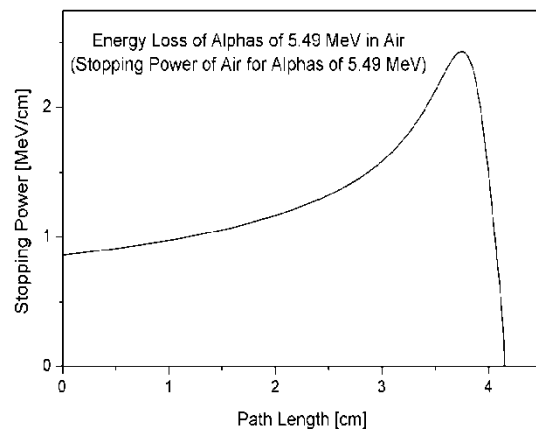
۲.۳. بررسی پاسخ آشکارساز جهت مونیتورینگ گاز رادن

در اینجا برای بررسی پاسخ آشکارساز جهت مونیتورینگ گاز رادن در حالت پرتوزایی بالای رادن، انرژی بجامانده ذره آلفای گسیل شده ناشی از واپاشی رادن و دختران آن در نقاط مختلف درون حجم فعال آشکارساز بدست آمده و سپس مقدار n بررسی و مقایسه شده است. در نهایت خروجی کد با توجه به



شکل (۲): منحنی براگ شبیه سازی شده برای ذره آلفای ناشی از رادن با انرژی 5/49 MeV

با توجه به شکل ۲ برد آلفا با انرژی اولیه 5/49 MeV برابر با $R_0 = 4/2145 \text{ cm}$ است. این نمودار تغییرات کاهش انرژی با نمودار منحنی براگ برای ذره آلفا با انرژی 5/49 MeV (شکل ۳) مطابقت دارد [۱۴].



شکل (۳): منحنی براگ برای ذرات آلفا در هوا با انرژی 5/49 MeV در شرایط دما و فشار استاندارد [۱۴]

برد ذره با انرژی 5/49 MeV با مقادیری که به دو روش مختلف بدست آمده اند مقایسه شده است. برد ذره آلفا با انرژی 5/49 MeV در هوا با استفاده از معادله $R = 1.24E - 2.62$ [۱۵] برابر با $R = 4/1876 \text{ cm}$ و درصد خطای $0/64\%$ و با استفاده از رابطه

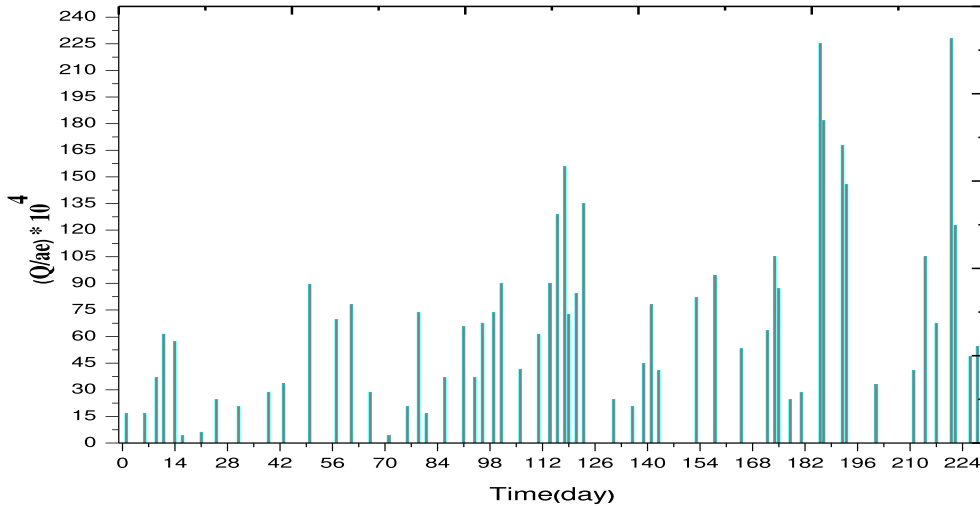
آب‌های چشمه مناطق زلزله‌خیز در بازه $۰ - ۲۵۰ \text{ kBq/m}^3$ تغییر می‌کند. در نتیجه مقدار ۱۰ kBq/m^3 به عنوان مقیاس مناسب است. در جدول ۲ مقدار $(Q/\alpha e) \times ۱۰^4$ پاسخ آشکارساز و A فعالیت رادن در آبگرم جوشان از تاریخ ۲۰۰۷/۱۲/۳ تا ۲۰۰۸/۸/۲۵ برگرفته از [۱۱] می‌باشد.

اطلاعات مربوط به تغییرات رادن در چشمه‌های آبگرم جوشان [۱۱] کالیبره شده است. با توجه به اینکه هدف مقایسه نتایج خروجی کد با داده‌های تجربی است، برای مدرج کردن آشکارساز باید خروجی کد در ۱۰^4 که مربوط به واحد غلظت رادن در آب‌های آلوده به رادن در چشمه‌های آبگرم بالای گسل‌های فعال است ضرب شود. عدد ۱۰^4 به این دلیل انتخاب می‌شود که بازه تغییرات رادن در

جدول (۲): مقایسه پاسخ آشکارساز و فعالیت رادن در آبگرم جوشان در زمان t

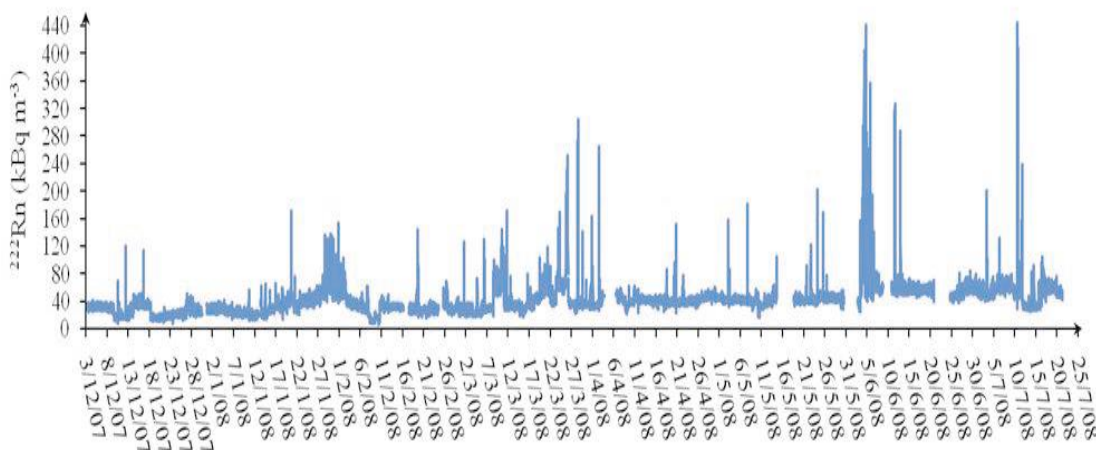
زمان(روز)	1	6	9	11	14	16	21	25	31
A	32	32	72	120	112	8	12	48	40
$(Q/\alpha e) \times ۱۰^4$	16/38	16/3	36/86	61/44	57/34	4/1	6/14	24/58	20/48
زمان(روز)	39	43	50	57	61	66	71	76	79
A	56	65	175	136	152	56	8	40	144
$(Q/\alpha e) \times ۱۰^4$	28/۷7	33/28	89/6	69/63	77/82	28/67	4/۱۶	20/4۲	73/7
زمان(روز)	81	86	91	94	96	99	101	106	
A	32	72	128	72	132	144	176	80	
$(Q/\alpha e) \times ۱۰^4$	16/۴8	36/8	65/53	36/۷6	67/58	73/72	90/11	41/6	
زمان(روز)	111	114	116	118	119	121	123	131	
A	120	176	252	304	142	165	264	48	
$(Q/\alpha e) \times ۱۰^4$	61/44	90/1۸	129	155/64	72/7	84/48	135/16	24/57	
زمان(روز)	136	139	141	143	153	158	165	172	
A	40	88	152	80	160	184	104	124	
$(Q/\alpha e) \times ۱۰^4$	20/4	45/05	77/82	40/9۷	81/92	94/2	53/24	63/48	
زمان(روز)	174	175	178	181	186	187	192	193	
A	205	170	48	56	440	355	328	285	
$(Q/\alpha e) \times ۱۰^4$	104/9	87	24/58	28/67	225/28	181/76	167/9	145/9	
زمان(روز)	201	211	214	217	221	222	226	228	
A	64	80	205	132	445	240	95	106	
$(Q/\alpha e) \times ۱۰^4$	32/76	40/۸۸	104/96	67/58	227/84	122/88	48/64	54/27	

اگر آشکارساز میکرونواری در چشمه های آبگرم استفاده شود با توجه به داده های اندازه گیری شده در جدول ۱ در بازه زمانی ۸ ماهه، پاسخ آشکارساز به صورت زیر خواهد بود (شکل ۴).



شکل (۴): پاسخ آشکارساز در بازه زمانی ۸ ماهه

مقایسه این نمودار با نمودار تغییرات غلظت رادن در چشمه آبگرم جوشان (شکل ۵) نشان می دهد که آشکارساز میکرونواری برای اندازه گیری غلظت رادن با اکتیویته بالا مناسب بوده و با توجه به تغییرات قابل مقایسه پاسخ آشکارساز با گذشت زمان میتوان از آن برای پیش بینی زلزله استفاده کرد.



شکل (۵): نمودار تغییرات غلظت رادن در چشمه آبگرم جوشان [۱۱]

آشکارساز به یک واپاشی، خروجی کد با توجه به اطلاعات مربوط به تغییرات رادن در چشمه های آبگرم جوشان کالیبره شده است. نتایج کالیبراسیون نشان می دهد که استفاده از این آشکارساز جهت پیش بینی زمین لرزه امکان پذیر است.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق امکان استفاده از آشکارساز گازی میکرو نواری در مونیتورینگ گاز رادن، هندسه آشکارساز توسط کد MCNPX شبیه سازی شده و پس از بررسی میانگین پاسخ

۵. مراجع

- [1] V.I. Ulomov, B.Z. Mavashev. On forerunner of a strong tectonic earthquake. Dokl. Acad. Sci. USSR 176 (1967) 319-322.
- [2] U. Koch, J. Heinicke. Radon Behaviour in Mineral Spring Water of Bad Bramburgh in the Temporal Vicinity of the 1992 Rörmond Earthquake. Geologie en Mijnbouw 73 (1994) 399-406.
- [3] J. Planinic, V. Radolic, D. Culo. Searching for an Earthquake Precursor: temporal variations of radon in soil and water. Fizika B9 (2000) 75-82.
- [4] L.L. Chyi, T.J. Quick, T.F. Yang, C.H. Chen. Soil gas radon spectra and earthquakes. Terr. Atmos. Ocean. Sci 16 (2005) 763-774.
- [5] R.G.M. Crockett, G.K. Gillmore. Spectral-decomposition techniques for the identification of radon anomalies temporally associated with earthquakes occurring in the UK in 2002 and 2008. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 10 (2010) 1079-1084.
- [6] U.S. EPA, Radon Measurement Method Definitions, National Radon Proficiency Program Handbook, (1996) 70-74.
- [7] G.S. Islam, A.K.F. Haque, Measurement of mixed radon and thoron daughter concentration using alpha and beta activities filtered from air. Radiation Measurements. 23 (1994) 737-742.
- [8] G Charpak, P Benaben, P. Breuil, E Nappi, P. Martinengo, V. Peskov, Performance of wire-type Rn detectors operated with gas gain in ambient air in view of their possible application to early earthquake predictions (2010) - arxiv.org
- [9] A. Oed, Position Sensitive Detector with Microstrip Anode for electron Multiplication with Gases. Nucl. Instr. and Meth. A263 (1988) 351.
- [10] R. Bouclier, G. Million, L. Ropelewski, F. Sauli, Yu.N. Pestov, L.I. Shekhtman, Performance of gas Microstrip chambers on glass substrata with electronic conductivity. Nucl. Instr. and Meth. A332 (1993)100.
- [11] H. Montazeri, A. Abbasnejadi, A. Negarestani, Continuous radon monitoring in the Jowshan hot spring as an earthquake precursor, SE Iran. Geochemical Journal 45 (2011) 463-472.
- [12] J. Miyamoto, G.F. Knoll. The statistics of avalanche electrons in micro-strip and micro-gap gas chambers. Nucl. Instr. and Meth. A399 (1997) 85-93.
- [13] P.F. Manfredi, Radiation detectors and signal processing lectures, (2008).
- [14] R.J. Magyar, Density Functional Theory of Extreme Environments, Los Alamos National Laboratories, (2015).
- [15] H. Cember, Introduction to Health Physics, 3rd ed., McGraw-Hill, (1996) 132.
- [16] M. R. Rezaie, A. Negarestani, M. Sohrabi, S. Mohammadi, D. Afzali, Parameterization of ^{241}Am and ^{230}Th alpha particle energy in dependence on distance traveled in air, J Radioanal Nucl. Chem. 293 (2012) 39-44.
- [17] R. Banjanac, A. Dragić, B. Grabež, D. Joković, D. Markushev, B. Panić, V. Udovičić, I. Aničin, Indoor Radon Measurements By Nuclear Track Detectors: Applications In Secondary Schools. Physics, Chemistry and Technology V4. (2006) 93 – 100.
- [18] M. Y.A. Mostafa, M.V. Zhukovsky, Alpha Self-Absorption Evaluation In Radiometric Filter Material For The Natural Range Of Alpha Energy (5-9MeV), RAD Conference Proceedings, V3 (2018) 115-118.