

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده علوم

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای کاربردی

عنوان :

تاثیر پارامترهای طبیعی بر غلظت گاز رادن

در منطقه با پرتوزایی بالای رامسر

اساتید راهنما :

آقای دکتر مسعود وهابی مقدم آقای دکتر سید محسن صالح کوتاهی

استاد مشاور :

آقای مهندس مسعود بیت‌اللهی

تهیه کننده :

مرتضی جعفرزاده خطیبانی

شهریور ۱۳۸۲

تقدیم به پدر و مادر عزیزم
که شمع وجودشان همواره روشنگر زندگیم بوده
و همیشه مشوقم در تحصیل هستند

تقدیم به خواهر مهربانم
و تقدیم به برادر عزیزم
که همیشه در زندگی یار و پشتیبان من هستند

با امتنان فراوان از :

اساتید ارجمند **جناب آقای دکتر مسعود وهابی مقدم و آقای دکتر محسن صالح کوتاهی** که بر من منت نهاده و راهنمایی این پایان نامه را عهده دار شدند.
امیدوارم همواره در زندگی خود مخصوصاً در عرصه‌های علمی، همچنان موفق و پیروز باشند.

با سپاس بسیار از :

استاد گرامی **جناب آقای مهندس مسعود بیت‌اللهی** معاونت محترم امور حفاظت در برابر اشعه سازمان انرژی اتمی ایران که قبول زحمت کردند و مشاوره این تحقیق را پذیرفتند و همچنین کلیه امکانات لازم را برای انجام این پروژه فراهم نمودند.

با تشکر و تقدیر فراوان از :

جناب آقای مهندس جهانگیر محمدی عضو هیئت علمی سازمان انرژی اتمی ایران که در طول کلیه مراحل انجام این تحقیق اینجانب را راهنمایی نمودند. بطوریکه می‌توانم اذعان کنم بدون کمک و راهنمایی‌های ایشان، انجام این پروژه در مدت زمان مقرر شده، برای من میسر نمی‌گشت.

با قدردانی از :

اساتید محترم **جناب آقای دکتر محمود صداقتی‌زاده و دکتر جواد رحیمی** به سبب مطالعه پایان نامه و همچنین قبول زحمت داوری پایان نامه

با سپاس فراوان :

از **خانواده محترم جناب آقای حسین موسی طالشی**، که در مدت زمان بیش از یکسال بخشی از منزل خود را جهت نصب تجهیزات اندازه‌گیری در اختیار سازمان انرژی اتمی ایران قرار دادند بطوریکه کلیه اندازه‌گیریهای مربوط به این پروژه در منزل ایشان انجام پذیرفت.
برای ایشان طول عمر زیاد همراه با شادکامی آرزو دارم.

و با تشکر فراوان از :

جناب آقای کلارستانی ریاست اداره هواشناسی شهر رامسر و کلیه همکاران ایشان که در جمع‌آوری اطلاعات هواشناسی به طور شبانه روز تلاش می‌کنند و با ارائه داده‌های دقیق مرا در انجام تحقیق یاری نمودند.

و با تشکر از برادرم **مهندس مصطفی جعفرزاده** که در انجام محاسبات آماری مرا یاری داد.

چکیده :

بشر در طی دوران زندگی خود بر روی کره زمین همواره تحت تابش پرتوهای رادیواکتیو قرار دارد این پرتوها یا منشا طبیعی دارند و یا منشا آنها مواد پرتوزای مصنوعی ناشی از فعالیتهای بشر می‌باشد. بر خلاف تصور عمومی، بیش از نیمی از پرتوگیری مردم جهان حاصل از مواد پرتوزای طبیعی است و نه مصنوعی. و در این بین بیشترین سهم مربوط به گاز رادن و دختران آن است و این در حالی است که در برخی از مکانهای دنیا، تابش زمینه پرتوهای طبیعی یونساز بسیار بیشتر از سایر مناطق دنیاست و طبیعی است ساکنان این مناطق دز بسیار بیشتری از پرتوهای رادیواکتیو دریافت می‌کنند. لذا تحقیقات وسیعی در این مکانها بر روی میزان دز دریافتی مردم انجام می‌گیرد. یکی از این مناطق شهر ساحلی رامسر واقع در شمال ایران است. دز موثر ناشی از استنشاق گاز رادن برای مردمی که در برخی از محلات این شهر ساکن هستند در یک تحقیق، تنها در یک دوره شش ماهه بیش از $35/87\text{mSv}$ اندازه‌گیری شد، که در مقایسه با میانگین سالانه دز دریافتی از رادن- 222 (یعنی $1/2\text{mSv}$) حد بالایی از پرتوگیری محاسبه می‌شود. به طور کلی دز دریافتی از رادن- 222 در محدوده $0/2\text{mSv}$ تا 10mSv می‌باشد [UNSCEAR (2000)].* به همین دلیل تاکنون تحقیقات فراوانی در این منطقه، که خاک آن از نظر رادیم بسیار غنی است، جهت تخمین و تعیین دز مردم از گاز رادن صورت گرفته است.

نکته‌ای که تاکنون بدان توجه نشده بود، نحوه تغییر غلظت رادن و به تبع آن تغییر دز دریافتی مردم از رادن، در اثر تغییر در شرایط جوی و پارامترهای محیطی بود. این تحقیق که در منطقه تالش محله رامسر انجام گرفته نشان دهنده آن است که بدلیل وجود همیشگی فشار و رطوبت نسبتاً زیاد در این شهر تغییرات جزئی این دو پارامتر، برخلاف بسیاری از مناطق دنیا، بر غلظت رادن در هوا تأثیر محسوس ندارد. اما سرعت باد و میزان ارتفاع از سطح زمین بر غلظت رادن تأثیر شدیدی دارد و باعث افت سریع غلظت رادن می‌شود. این امر با نتایج مشابهی که در سایر مناطق صورت گرفته سازگاری دارد. تأثیر پارامترهای یاد شده در منطقه مورد مطالعه می‌تواند موجب تغییر غلظت رادن حتی با ضریب ۴ گردد. از طرفی افزایش دمای هوا در منطقه موجب افزایش محسوس غلظت رادن می‌شود.

* UNSCEAR (2000), United Nations Scientific Committee on the Sources and Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation (vol.1), United Nations, New York

فهرست

فصل اول

مقدمه	۱
فصل دوم	مبانی نظری
۱-۲: پرتوزایی طبیعی	۴
۱-۱-۲: سریهای واپاشی	۴
۱-۱-۱-۲: سریهای واپاشی معده بیتمن	۸
۲-۱-۱-۲: تعادل	۱۰
۳-۱-۲: واحدهای اندازه‌گیری اشعه	۱۱
۱-۳-۱-۲: اکتیویته	۱۱
۲-۳-۱-۲: انرژی پتانسیل آلفا	۱۲
۳-۳-۱-۲: غلظت انرژی پتانسیل آلفا	۱۳
۴-۳-۱-۲: غلظت معادل حالت تعادل	۱۳
۵-۳-۱-۲: پرتودهی	۱۴
۶-۳-۱-۲: دز جذب شده	۱۵
۷-۳-۱-۲: دز معادل	۱۵
۸-۳-۱-۲: دز موثر	۱۶
۲-۲: منابع پرتوگیری بشر از منابع طبیعی	۱۸
۱-۲-۲: پرتوهای کیهانی	۱۸
۲-۲-۲: پرتوهای ناشی از زمین	۱۹
۱-۲-۲-۲: پرتوگیری از رادن	۲۰
۲-۲-۲-۲: پرتوگیری از صنایع استخراجی	۲۱
۳-۲: مناطق با پرتوزایی طبیعی بالا	۲۳
۱-۳-۲: هند	۲۳
۲-۳-۲: برزیل	۲۳
۳-۳-۲: ایران	۲۴
۴-۳-۲: سایر مناطق با پرتوزایی طبیعی بالا در جهان	۲۶
۴-۲: رگسیون و مدل‌سازی خطی	۲۸

فصل سوم رادن

۴۵	۳- رادن
۴۵	۳-۱: خواص فیزیکی
۴۷	۳-۲: اهمیت رادن
۵۰	۳-۲-۱: عوامل موثر بر غلظت رادن در محیط بسته
۵۰	۳-۲-۱-۱: تولید در مواد زمینی
۵۲	۳-۲-۱-۲: انتشار
۵۳	۳-۲-۱-۳: پس رفت
۵۴	۳-۲-۱-۴: نفوذ
۵۴	۳-۲-۱-۵: انتقال از آب و گاز طبیعی
۵۴	۳-۲-۱-۶: آهنگ ورود
۵۵	۳-۲-۲: عوامل موثر بر غلظت رادن در محیط باز
۵۸	۳-۳: روشهای اندازه گیری غلظت گاز رادن
۵۹	۳-۳-۱: اطاقک سنتیلاسیون یا لوکاس
۶۲	۳-۳-۲: روش دو فیلتره
۶۲	۳-۳-۳: تکنیک جذب سطحی
۶۴	۳-۳-۴: آشکارسازهای ردپای هسته ای

فصل چهارم روشهای تجربی

۶۶	۴: روشهای تجربی
۶۶	۴-۱: منطقه مورد مطالعه
۶۶	۴-۱-۱: موقعیت جغرافیایی منطقه
۷۰	۴-۲: وسایل و تجهیزات مورد استفاده
۷۰	۴-۲-۱: دستگاههای قابل حمل که در محل مورد سنجش بکار گرفته شده اند
۷۰	۴-۲-۱-۱: دستگاه نمونه برداری از ذرات گرد و غبار
۷۱	۴-۲-۱-۲: دستگاه سنجش سرعت باد Air flow
۷۳	۴-۲-۱-۳: دستگاه سنتیلومتر پراسی PRASSI
۷۵	۴-۲-۲: آشنایی با دستگاههای مورد استفاده در ایستگاه هواشناسی رامسر
۷۵	۴-۲-۲-۱: اندازه گیری سرعت باد
۷۶	۴-۲-۲-۲: اندازه گیری فشار هوا
۷۹	۴-۲-۲-۳: اندازه گیری دمای هوا
۸۰	۴-۳: روش کار
۸۰	۴-۳-۱: انتخاب زمین
۸۱	۴-۳-۲: مروری بر مراحل کار
۸۲	۴-۳-۳: کار با دستگاه پراسی

۴-۳-۴: کار با دستگاه اندازه‌گیر قطر ذرات ۸۵

۴-۳-۵: کار با دستگاه قابل حمل اندازه‌گیر سرعت باد ۸۶

فصل پنجم داده‌های سنجش

۵: داده‌های سنجش ۸۷

داده‌های مربوط به اندازه‌گیری مکان شماره یک ۸۸

داده‌های مربوط به اندازه‌گیری مکان شماره دو ۹۳

داده‌های مربوط به اندازه‌گیری قطر ذرات ۱۰۱

داده‌های مربوط به اندازه‌گیری سرعت باد در محل ۱۰۴

داده‌های مربوط به اندازه‌گیری میانگین دز گاما در محل شماره دو ۱۰۵

فصل ششم بحث و نتیجه‌گیری

۶: بحث و نتیجه‌گیری ۱۰۶

۱-۶: خلاصه محاسبات رگرسیون بصورت جداول و نمودارها ۱۰۷

فصل هفتم مراجع و منابع

منابع ۱۱۸

فصل اول : مقدمه

از سال ۱۸۹۵ که چشمه‌های مصنوعی رادیواکتیو توسط بشر ساخته شدند و در سال ۱۹۰۳ ماری کوری و پیر کوری با کشف رادیوم پی به خواص منحصر بفرد اشعه رادیواکتیو در تشخیص‌های پزشکی بردند، توجه همگان به این پدیده جدید و جالب به طور روزافزونی افزایش یافت و مطالعات زیادی جهت استفاده هر چه بیشتر و بهتر از مواد رادیواکتیو در آزمایشگاه‌های سراسر دنیا صورت گرفت و کاربردهای متنوعی برایشان یافت می‌شد. تا جاییکه بدلیل خاصیت فسفرسانس بعضی از این مواد رادیواکتیو، از آنها در موارد تزئینی نیز استفاده می‌شد. در یکی از کارخانه‌های ساعت سازی دخترانی که از این مواد فسفرسانس رادیواکتیو جهت نشان‌گذاری عقربه‌های ساعت استفاده می‌کردند، از لب و دهان خود برای شکل دادن قلموها استفاده می‌کردند. به این ترتیب مقداری از این مواد وارد بدن آنان می‌گردید. پس از گذشت مدتی تعداد زیادی از این کارگران به بیماریهای صعب‌العلاجی همچون سرطان ریه و مری مبتلا می‌شدند. از طرف دیگر کارگرانی که در معادن کار می‌کردند، در موارد زیادی به بیمارهای مشابهی مبتلا می‌شدند، حتی ماری کوری نیز که بر روی رادیوم تحقیق می‌کرد در اثر ابتلا به بیماری سرطان در گذشت. پس از مدتی تحقیق نظریه‌های اولیه بر این پایه شکل گرفتند که اشعه‌های رادیواکتیو عامل اصلی ایجاد سرطان در این کارگران و کلیه کسانی است که با مواد رادیواکتیو سروکار دارند. پس از مدتی که این ادعا و نظریه‌ها ثابت شد، نگرانی عمومی در مورد پرتوگیری از مواد رادیواکتیو طبیعی و مصنوعی روز بروز افزایش یافت. تا این که با انفجار اولین بمب هسته‌ای در هیروشیما و تبعات بعدی آن و همچنین وقوع حادثه در نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل در ۲۶ آوریل سال ۱۹۸۶ توجه عمومی به این جهت سوق یافت که مواد پرتوزای مصنوعی مهمترین عامل پرتوگیری بشر می‌باشد. اما تحقیقات متعددی نشان دادند که این نظر درست نیست بلکه برخلاف تصور اکثر مردم، نگرانی اصلی می‌بایست متوجه مواد پرتوزای طبیعی باشد. چون بیشتر پرتوگیری مردم ناشی از این مواد طبیعی است. بشر در طول حیات خود همواره در معرض تابش زمینه ناشی از چشمه‌های طبیعی، پرتوهای کیهانی، هسته‌های پرتوزای کیهان‌زا، زنجیره‌های پرتوزایی طبیعی و ویژه هسته‌های پرتوزای منفرد بوده است.

میزان پرتوگیری طبیعی در بعضی نقاط جهان معمولاً با فکتور ۳ تغییر می‌کنند. با اینحال در بسیاری از مکانها میزان پرتوگیری ناشی از تابش زمینه از میزان متوسط فراتر رفته به فاکتور ۱۰ و گاهی اوقات به فاکتور ۱۰۰ می‌رسد.

مطالعات اپیدمیولوژیکی انجام شده بر روی آن دسته از معدن‌کاران معادن زیر زمینی اورانیوم که در معرض گاز رادن (^{222}Rn) و دختران بویژه ^{218}Po و ^{214}Po بوده‌اند، افزایش ریسک ابتلا به سرطان

ریه را نشان می‌دهد (UNSCEAR 1982). همچنین بررسی‌های انجام شده در کشورهای مختلف، استنشاق گاز رادن و دختران آن را عمده‌ترین عامل پرتوگیری مردم از منابع طبیعی محیط‌زیست دانسته است. بر اساس گزارش کمیته علمی اثرات پرتوهای اتمی سازمان ملل متحد (UNSCEAR)، بطور متوسط نیمی از دز معادل سالانه مردم در مناطقی که از نظر پرتوهای زمینه عادی بشمار می‌روند ناشی از گاز رادن و دختران آن است (UNSCEAR 1977). از اینرو فعالیتهای توسعه‌ای و پژوهشی گوناگونی جهت اندازه‌گیری گاز رادن در دهه گذشته مورد توجه مراکز بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه قرار گرفته است. شناخت و اندازه‌گیری مقدار گاز رادن در محیط کار و زیست از اینرو حائز اهمیت است که گاز رادن گازیست نادر که از زنجیره طبیعی اورانیوم با سه زنجیره ^{238}U که در مواد مختلف طبیعی و از جمله مواد ساختمانی موجود است، بوجود آمده و می‌تواند به خارج از محیط تولید کننده خود نفوذ نماید. همچنین این گاز دارای نیمه‌عمر پرتوزایی $3/8$ روز بوده و به دختران آلفا زای خود تجزیه می‌گردد. نیمه عمر بیولوژیکی دختران رادن در ریه بین چند ساعت تا یک روز بوده و در نتیجه گاز رادن و دختران آن می‌توانند بطور موضعی سلول‌های ریه را تحت بمباران قرار دهند (ICRP 1982).

رادن جدا از خطراتی که تولید می‌نماید مفید نیز می‌باشد. امکان انتقال ^{222}Rn در خاک، آب و اتمسفر زمین باعث می‌گردد که رادن به عنوان یک عنصر کم مقدار مفید بصورت یک متغیر با ارزش برای اهداف ژئوفیزیکی، ژئوشیمی، هیدرولوژی و اتمسفر باشد، دامنه این کاربردها از اکتشاف منابعی مانند اورانیوم و ذخائر هیدروکربنی تا مطالعه جریان گازها و مخلوط شدن آنها در اتمسفر و نیز جا بجایی سیالات شناخته شده در داخل زمین، همچنین کوشش‌هایی که در جهت پیش بینی حوادث آتشفشانی و زلزله‌ای از طریق تغییرات اختطار دهنده در غلظت‌های رادن در زمین می‌باشد.

در تمامی موارد کاربردی فوق و همچنین در تخمین میزان پرتوگیری مردم از گاز رادن آنچه که به طور مشترک در همه روشها مد نظر است، تعیین غلظت گاز رادن برای آن موقعیت و کاربرد خاص است. در واقع می‌توان گفت در تمامی مواردی که سروکار با رادن است به نحوی دانستن چگونگی تغییرات غلظت رادن در منطقه و محل مورد نظر ضروری است. به عنوان مثال جهت پیش‌بینی زلزله می‌بایست اطلاع دقیقی از مقدار زمینه گاز رادن در شرایط نرمال و چگونگی تغییرات نرمال آن تحت شرایط عادی در دست باشد تا به هنگام مشاهده تفاوت قابل توجهی بین میزان اندازه‌گیری شده و میزان پیش بینی شده بتوان وقوع پدیده خاصی را پیش بینی نمود.

به همین جهت مدت زیادی است که محققان به تعیین نحوه ارتباط تغییرات غلظت رادن با سایر عوامل از جمله عامل طبیعی می‌پردازند. در اکثر این پژوهش‌ها تنها اثر یک یا دو پارامتر

طبیعی همچون دما یا رطوبت یا فشار و یا ارتفاع از سطح زمین، بر غلظت گاز رادن مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این پژوهش که در منطقه رامسر صورت گرفت سعی شد تا جایی که امکان دارد تاثیر همه عوامل جوی که احتمال می‌رفت بر غلظت رادن تاثیر گذار باشند، به طور توأم بررسی شوند تا بتوان نقش هر کدام از این عوامل را به تنهایی در حضور سایر عوامل بر غلظت رادن تعیین نمود. آزمایشات و بررسی‌های مختلف که توسط محققان زیادی در شهر رامسر صورت گرفته‌اند، همگی حاکی از این امر هستند که در محلات خاصی از این شهر بدلیل وجود غلظت بالای ^{226}Ra در خاک این مناطق، غلظت بالایی از ^{222}Rn و دختران آن نیز در هوای این مناطق وجود دارد. از آنجایی که هدف این پژوهش بررسی نقش پارامترهای مختلف طبیعی بر غلظت گاز رادن می‌باشد، چون در این محلات از شهر رامسر غلظت رادن به طور معمول بالاست، به همین دلیل انتظار می‌رفت با تغییر شرایط جوی تغییر در غلظت گاز رادن به طور محسوسی تغییر یابد. بطوریکه این مقدار تغییرات به اندازه‌ای باشند که دستگاههای اندازه‌گیری غلظت رادن به خوبی بتوانند این تغییرات را ثبت کنند.

به منظور انجام این پژوهش، در مدت زمانی نزدیک به یک سال تغییرات غلظت گاز رادن در روزهای مختلفی از سال به همراه اطلاعات مربوط به پارامترهای جوی اندازه‌گیری و ثبت شد. و در نهایت با استفاده از روش‌های آماری و مدل سازی رگرسون، سهم هر یک از پارامترها به عنوان فاکتورهای تلغیظ بررسی شد. فاکتورهایی همچون ارتفاع از سطح زمین، دما، رطوبت، فشار، میزان ابرناکی هوا، سرعت باد و نحوه توزیع قطر ذرات معلق در هوا مورد توجه قرار گرفتند.

در پی این مقدمه، مبانی نظری در فصل دوم بیان گردیده است. این فصل خود به دو بخش مجزا از هم تقسیم گردیده است. بخش نخست این فصل مبانی وپاشی پرتوزا، واحدهای اندازه‌گیری اشعه، سری‌های وپاشی، منابع پرتوگیری بشر و مناطق با پرتوزایی بالا را در خود جای داده است. و بخش دوم این فصل حاوی مطالبی در مورد مبانی ریاضی و اصول مدل سازی رگرسیون به طور خلاصه می‌باشد. پس از آن در فصلی جداگانه یعنی در فصل سوم، خصوصیات فیزیکی و هسته‌ای و بهداشتی گاز رادن با استفاده از منابع مختلف بیان گردیده است. روشهای تجربی که خود شامل جغرافیا و شناخت منطقه مورد مطالعه و همچنین ابزارها و روش‌های اندازه‌گیری است، در فصل چهارم تشریح شده است و در فصول پنجم و ششم به ترتیب، داده‌های حاصل از سنجشهای انجام شده و بحث پیرامون آنها ارائه شده است.

فصل دوم : مبانی نظری

۱-۲ پرتوزایی طبیعی

۲-۱-۱-۲ سریهای واپاشی (زنجیره های واپاشی) radioactive series

چهار سری پرتوزایی یا چهار زنجیره متفاوت از هسته های رادیواکتیو ممکن است مشاهده شود . هر کدام از این سریها را می توان بگونه ای بر حسب جرم اتمی دسته بندی کرد که جرم اتمی همه عناصر تشکیل دهنده یک زنجیره در رابطه $A=4n+m$ صدق کنند . که در این رابطه A جرم اتمی و n بزرگترین عدد صحیح است که اگر A را بر آن تقسیم کنیم باقیمانده که همان m است عددی صحیح باشد . بنابراین چهار سری ممکن عبارت اند از سری $4n$ و سری $4n+1$ و سری $4n+1$ و سری $4n+2$ و سری $4n+3$.

اعضای سه سری از این چهار سری واپاشی در طبیعت یافت میشوند و تقریباً اکثر مواد رادیواکتیو در را شامل می شوند .

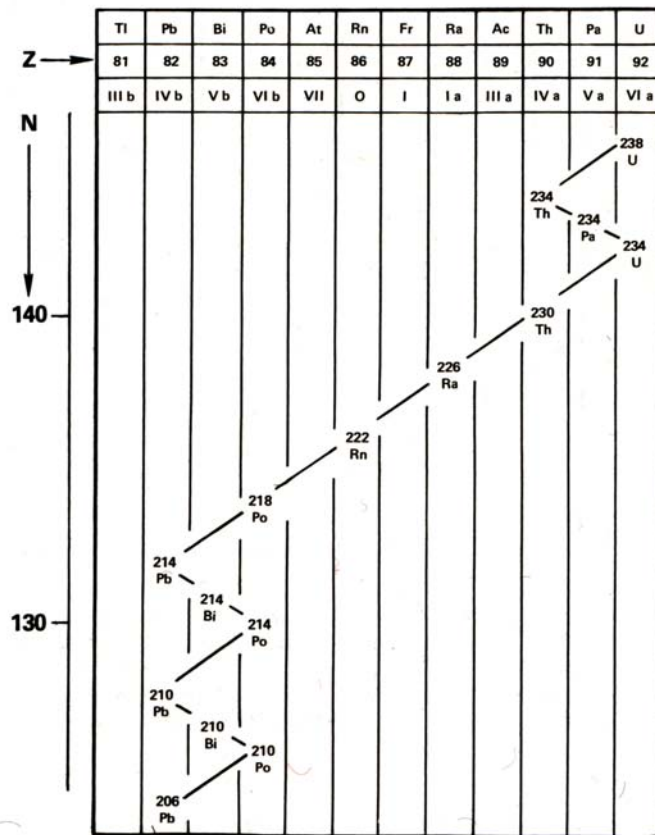
سری $4n$ که با ^{232}Th شروع می شوند به نام سری ^{232}Th شناخته می شوند . سری $4n+2$ که با ^{238}U شروع میشوند به نام سری ^{238}U معروف اند . همینطور در سری $4n+3$ ، ^{235}U در رأس قرار دارد . هسته های پرتوزایی که در رأس هر یک از این زنجیره ها قرار دارند دارای نیمه عمری در حدود عمر زمین هستند .

چهارمین سری ، یعنی $4n+1$ یا سری نپتونیم تا کنون در طبیعت مشاهده نشده است به استثناء محصول نهایی این سری که ذاتاً پایدار است یعنی ^{209}Bi .

مراحل اصلی واپاشی برای سه سری رادیواکتیو که در طبیعت یافت می شوند در شکل های (۱-۲) و (۲-۲) و (۳-۲) آورده شده است [۱]. این شکلها نمودارهایی هستند که محور افقی آن بر حسب عدد اتمی یا Z و محور عمودی آن بر حسب N یعنی تعداد نوترونها رسم گردیده اند. همچنین در بالای شکلها علامت اختصاری عناصر و گروه آنها در جدول تناوبی متناسب با Z و N آورده شده است .

در هر کدام از این زنجیره ها یکی از ایزوتوپ های رادن تقریباً در وسط زنجیره به چشم می خورد .

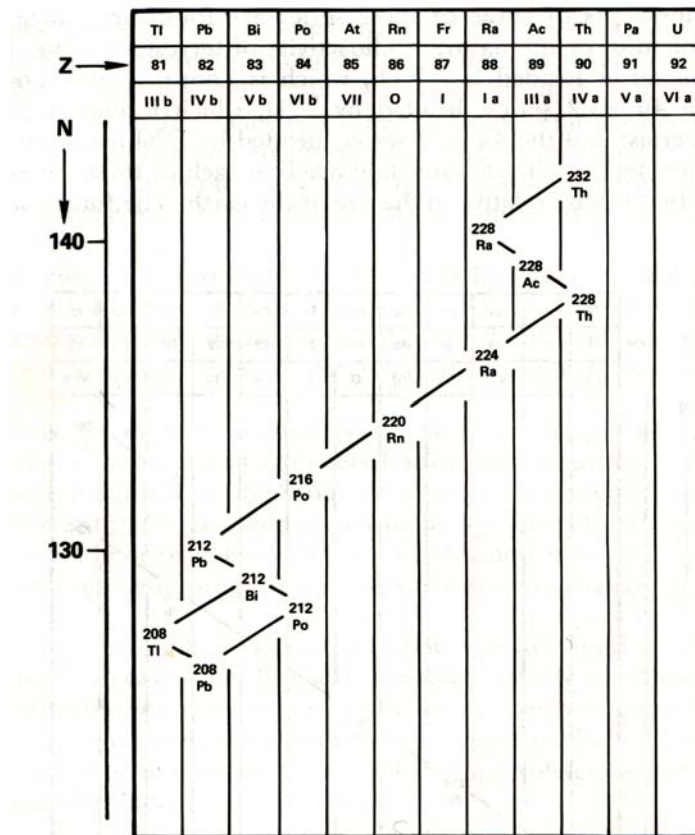
جزئیات مربوط به هر کدام از سه سری را می توان بطور جداگانه در جدول های (۱-۲) و (۲-۲) و (۳-۲) یافت [۱] . البته تنها رادن و دختران آن در این جداول نشان داده شده اند . اطلاعات مربوط به ایزوتوپ های دیگر را می توان در منابع دیگر جستجو کرد [۲] .



شکل ۱-۲ سربهای واپاشی ^{238}U

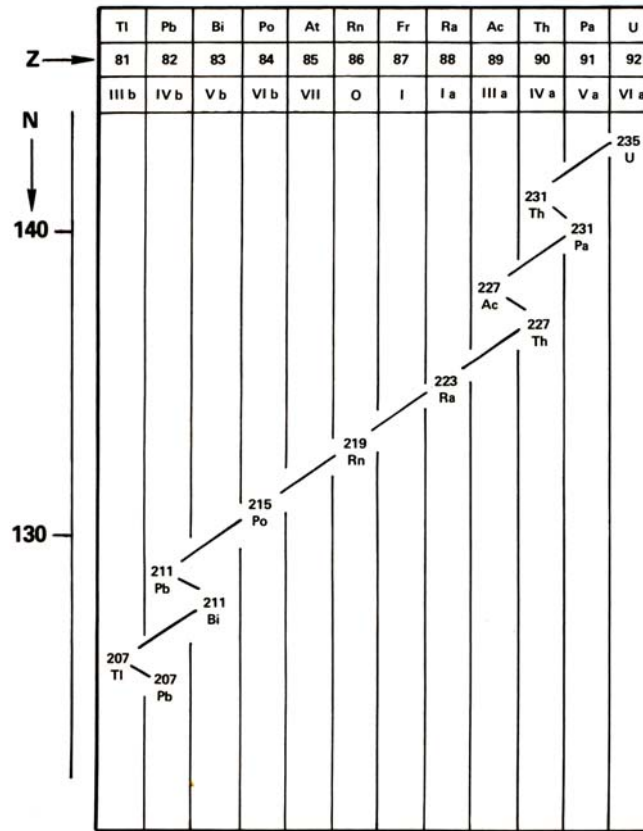
Radionuclide	Historical name	Half-life	Major radiation energies (MeV)		
			Alpha	Beta	Gamma
^{222}Rn	Emanation, radon (Rn)	3.823 d	5.49		
^{218}Po	Radium A	3.05 min	6.00		
^{214}Pb	Radium B	26.8 min		0.67	0.295
				0.73	0.352
				1.02	
^{214}Bi	Radium C	19.7 min		1.0	0.609
				1.51	1.12
				3.26	1.764
^{214}Po	Radium C'	164 μs	7.69		
^{210}Pb	Radium D	22.3 y		0.015	0.047
				0.061	
^{210}Bi	Radium E	5.01 d		1.161	
^{210}Po	Radium F	138.4 d	5.305		
^{206}Pb	Radium G	Stable			

جدول ۱-۲ مشخصات اصلی اعضای زنجیره واپاشی اورانیوم ^{238}U

شکل ۲-۲ سربهای واپاشی ^{232}Th

Radionuclide	Historical name	Half-life	Major radiation energies (MeV)		
			Alpha	Beta	Gamma
^{220}Rn	Emanation, thoron (Tn)	55 s	6.29		
^{216}Po	Thorium A	0.15 s	6.78		
^{212}Pb	Thorium B	10.64 h		0.331	0.239
				0.569	0.300
^{212}Bi	Thorium C	60.6 min	6.05	1.55	0.040
			6.09	2.26	0.727
					1.620
^{212}Po	Thorium C'	304 ns	8.78		
^{208}Tl	Thorium C''	3.05 min		1.28	0.511
				1.52	0.583
				1.80	0.860
					2.614
^{208}Pb	Thorium D	Stable			

جدول ۲-۲ مشخصات اصلی اعضای زنجیره واپاشی توریم



شکل ۲-۳ سریهای واپاشی ^{235}U

Radionuclide	Historical name	Half-life	Major radiation energies (MeV)		
			Alpha	Beta	Gamma
^{219}Rn	Emanation, actinon (An)	4.0 s	6.42 6.55 6.82		
^{215}Po	Actinium A	1.78 ms	7.38		
^{211}Pb	Actinium B	36.1 min		0.29 0.56 1.39	0.405 0.427 0.832
^{211}Bi	Actinium C	2.15 min	6.28 6.62		
^{207}Tl	Actinium C''	4.79 min		1.44	
^{207}Pb	Stable				

جدول ۲-۳ مشخصات اصلی اعضای زنجیره واپاشی اکتینوم یا اورانیوم ^{235}U

۱-۱-۱-۲ سریهای واپاشی : معادله بیتمن Bateman Equation

در یک سری واپاشی های پشت سر هم، مرتباً واپاشی‌ها منجر به تولید هسته های پرتوزای جدید می‌شوند. فرض کنیم N_1 و N_2 و ... و N_k و ... و N_r معرف تعداد هسته های پرتوزا، در یک زنجیره واپاشی معین باشند، بطوریکه N_1 تعداد هسته های اولیه و N_r تعداد هسته های محصولات نهایی پایدار را نشان دهند. در این صورت معادله دیفرانسیلی که تغییرات تعداد هسته های اولیه را نسبت به زمان بیان می‌کند، عبارت است از:

$$dN_1 / dt = -\lambda N_1 \quad (1-2)$$

در نتیجه:

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda t} \quad (2-2)$$

برای هسته دوم چنین می‌توانیم عنوان کنیم که، این هسته‌ها با همان آهنگی که هسته های اول واپاشی می‌کنند تولید می‌شوند و سپس خود در فرآیند واپاشی دیگری با ثابت λ به ایزوتوپ سوم تبدیل می‌شوند.

$$dN_2 / dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (3-2)$$

به طور کلی برای هسته پرتوزای k ام می‌توان نوشت

$$dN_k / dt = \lambda_{k-1} N_{k-1} - \lambda_k N_k \quad (4-2)$$

و چون هسته نهایی پایدار است ($\lambda = 0$)

$$dN_r / dt = \lambda_{r-1} N_{r-1} \quad (5-2)$$

معادله دیفرانسیل در حالت کلی عبارت است از:

$$dN_i / dt = \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i \quad (6-2)$$

$$dN_i / dt + \lambda_i N_i = \lambda_{i-1} N_{i-1} \quad \text{یا}$$

در نتیجه:

$$N_i e^{\lambda_i t} = \int e^{\lambda_i t} \lambda_{i-1} N_{i-1} dt + C_i \quad (7-2)$$

در این رابطه C_i بیانگر تعداد اتمهای اولیه نوع i ام در زمان $t=0$ می‌باشد.

در سال 1910 بیتمن Bateman [۳] جواب معادله بالا را برای حالت های کلی بسط داد.

$$A_1 = \frac{N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} \quad (8-2)$$

یا

$$A_j = \frac{N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_j)(\lambda_2 - \lambda_j) \dots (\lambda_{j-1} - \lambda_j)(\lambda_{j+1} - \lambda_j) \dots (\lambda_n - \lambda_j)} \quad (9-2)$$

برای نشان دادن این مطلب که چگونه می‌توان با این فرمول‌ها اکتیویته محصولات یک واپاشی را در زمان‌های مختلف محاسبه نمود، از مثال واپاشی چشمه ^{222}Rn استفاده می‌کنیم. در این مثال اکتیویته ^{218}Po ، ^{214}Pb و ^{214}Bi پس از گذشت شصت دقیقه محاسبه می‌شود. در جدولی که متعاقباً آورده می‌شود اطلاعات مربوط به این سه هسته پرتوزا درج گردیده است.

n	Radionuclide	$T_{1/2}$	$\lambda(\text{min})^{-1}$	$e^{-\lambda t}$
۱	^{222}Rn	3.823d	1.26×10^{-4}	0.992
۲	^{218}Po	3.05 min	0.227	1.22×10^{-6}
۳	^{214}Pb	26.8 min	0.0259	0.211
۴	^{214}Bi	19.7 min	0.0352	0.121

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$= 0.992 N_{10}$$

$$N_1 \lambda_1 = (0.00126 \text{ min}) N_{10}$$

و همچنین

برای هسته پرتوزای دوم می‌توان نوشت:

$$N_2 = [\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)] N_{10} e^{-\lambda_1 t} + [\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)] N_{10} e^{-\lambda_2 t}$$

$$= 5.47 \times 10^{-4} N_{10}$$

و همچنین

$$N_2 \lambda_2 = (0.000124 \text{ min}^{-1}) N_{10}$$

که مقدار با اکتیویته هسته پرتوزای اول تقریباً برابر است.

برای هسته سوم با فرض اینکه $N_{20} = N_{30} = 0$ میتوان بدست آورد که:

$$+ \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} \right] N_{10} e^{-\lambda_2 t}$$

$$+ \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right] N_{10} e^{-\lambda_3 t}$$

$$= 0.0036 N_{10}$$

و اکتیویته آن برابر است با :

$$N_3\lambda_3 = (0.0000938 \text{ min}^{-1})N_{10}$$

به همین ترتیب برای چهارمین هسته نیز اکتیویته را محاسبه می‌کنیم . (با این فرض که در زمان شروع تنها هسته نوع اول وجود داشته است)

$$\begin{aligned} N_4 = & \left[\frac{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} \right] N_{10} e^{-\lambda_1 t} \\ & + \left[\frac{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} \right] N_{10} e^{-\lambda_2 t} \\ & + \left[\frac{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} \right] N_{10} e^{-\lambda_3 t} \\ & + \left[\frac{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} \right] N_{10} e^{-\lambda_4 t} \end{aligned}$$

و اکتیویته آن برابر است با :

$$N_4\lambda_4 = (0.0000620 \text{ min}^{-1})N_{10}$$

۲-۱-۱-۲ - تعادل (Equilibrium) :

عموماً برای آن گونه از زنجیره های واپاشی که در آنها واپاشی دو هسته پرتوزای اول منجر به تشکیل یک هسته سوم پایدار ختم می‌شود ، دو حالت رخ می‌دهد . یک حالت این است که (با توجه به معادله (۲-۹) هسته والد یا اولیه دارای عمری طولانی تر از هسته دخترش باشد ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) . و حالت دیگر عکس آن یعنی عمر هسته دختر بیشتر باشد ($\lambda_1 \gg \lambda_2$) .

اگر حالت اول اتفاق بیافتد یعنی ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) در صورت موقعیت تعادل رادیواکتیو حاصل می‌شود . در حالت نسبت واپاشی هسته دختر به واپاشی هسته والد ثابت می‌ماند. این را می‌توان توسط معادله (۲-۹) برای زمان های به اندازه کافی بزرگ t نشان داد . پس از گذشت زمان زیاد t مقدار $e^{-\lambda_2 t}$ در مقایسه با $e^{-\lambda_1 t}$ قابل چشم پوشی است و :

$$N_2 = [\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)] N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

اما چون $N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$ بنابراین :

$$N_2 / N_1 = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (10-2)$$

این حالت ، حالت تعادل ناپایدار یا گذرا نامیده می‌شود . در حالت حدی که در آن $\lambda_1 \ll \lambda_2$ در معادله (۱۰-۲) می‌باشد ،

$$N_2 / N_1 = \lambda_1 / \lambda_2$$

و یا

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

که آن را تعادل وابسته (secular equilibrium) می‌نامند . در تعادل وابسته سرانجام هستهٔ والد و دختر با اکتیویتهٔ مشابه پرتوزایی می‌کنند .

در صورتی که عمر هستهٔ والد نسبت به عمر هستهٔ دختر کوتاهتر باشد ($\lambda_1 \gg \lambda_2$) ، در این صورت در هیچ زمانی تعادلی رخ نمی‌دهد .

۲-۱-۳- واحدهای اندازه گیری اشعه

۲-۱-۳-۱- اکتیویته

به طور کلی، اکتیویته یا فعالیت یک نمونه، عبارت است از اندازه گیری میزان واپاشی آن نمونه، واحد اندازه گیری اکتیویته بکرل است که با نماد Bq نشان داده میشود و این نامگذاری به افتخار هنری بکرل صورت گرفته است، وی در سال ۱۹۰۳ به اتفاق زوج کوری به خاطر تلاشهایشان در کشف رادیواکتیویته مفتخر به کسب جایزه نوبل گردید، یک بکرل (1Bq) معادل با (1/s) است، همانطور که هرتر اسم ویژه‌ای برای 1/s به منظور اندازه گیری تعداد بسامد است، بکرل نیز اسم ویژه‌ای برای 1/s به منظور اندازه گیری تعداد واپاشی‌ها در ثانیه است، پس می‌توان گفت 1Bq یعنی یک واپاشی در زمان یک ثانیه .

واحد دیگر اکتیویته که یک واحد قدیمی ولی پر مصرف است، Ci است، یک Ci یعنی واپاشی یک گرم ^{222}Rn در ثانیه که معادل است با 3.7×10^{10} واپاشی در ثانیه، پس در واقع 1Ci برابر است با 3.7×10^{10} بکرل. همچنین چون کمیسیون بین المللی استاندارد در سال ۱۹۸۴ تصویب کرده بود که از واحد کوری تنها برای اندازه گیری فعالیت رادیوم استفاده گردد، لذا در آن زمان واحد دیگری به نام رادرفورد عنوان شده بود که برابر بود با 1.0×10^{10} Bq .

۲-۱-۳-۲- انرژی پتانسیل آلفا (Potential Alpha Energy) :

مهمترین موضوعی که در رابطه با خطرات زیستی گاز رادن می‌بایست مد نظر قرار گیرد ، مسئله دختران رادن است ، این خطرات همان عواقب تنفس کردن گاز رادن (یا خود رادن) و باقی ماندن آنها در ریه و شش‌ها می‌باشند ، چون دختران رادن اکثراً گسیلنده آلفا هستند به همین جهت تعیین دقیق میزان انرژی، که توسط گسیل ذرات آلفا به بافت های تنفسی می‌رسد از اهمیت شایان توجهی برخوردار است .

Radionuclide	Half-life ($T_{1/2}$)	Potential alpha energy (ϵ_p) (MeV per atom)	Total potential alpha energy per unit of activity (ϵ_p/λ) (10^{-10} J Bq $^{-1}$)
^{222}Rn	3.823 d	19.2	14,600
^{218}Po	3.05 min	13.7	5.79
^{214}Pb	26.8 min	7.69	28.5
^{214}Bi	19.7 min	7.69	21.0
^{214}Po	164 μs	7.69	2.9×10^{-6}
^{220}Rn	55 s	20.9	2.65
^{216}Po	0.15 s	14.6	5.06×10^{-3}
^{212}Pb	10.64 h	7.80	690
^{212}Bi	60.6 min	7.80	65.5
^{212}Po	304 ns	8.78	6.2×10^{-9}
^{219}Rn	4.0 s	20.7 ^a	0.191
^{215}Po	1.78 ms	13.94	5.73×10^{-5}
^{211}Pb	36.1 min	6.56 ^b	32.8
^{211}Bi	2.15 min	6.56 ^b	1.95
^{207}Tl	4.79 min	—	—

^a Includes weighted average of several alpha energies.

^b Weighted average of 16% of 6.28 MeV and 84% of 6.62 MeV.

جدول ۲-۴ مقادیر Potential Alpha Energy

به منظور ارتباط دادن بین غلظت دختران رادن در جو ، و دز دریافتی از آنها توسط بشر ، کمیتهای مختلفی تعریف گردیده اند، یکی از این کمیتهای ، کمیته انرژی پتانسیل آلفایی است ، که آن کل انرژی است که یک اتم در صورتی که تمام زنجیره واپاشی خود را تا انتها طی کند، می‌تواند توسط گسیل ذرات ، آزاد کند ، عبارت پتانسیل از این حقیقت ناشی می‌شود که یک اتم در صورتی واپاشی کند در خود قابلیت تولید مقدار معینی انرژی را دارد ، به عبارت دیگر پتانسیل انرژی آلفایی ، مقدار انرژی است که یک اتم پس از آن که در ریه جایگزید، تا پایان زنجیره تلاشی خود در ریه آزاد می‌کند ، دلیل

این که تنها انرژی ذرات آلفا در تعریف مد نظر قرار گرفته اند، این است که این ذرات از نظر اثرات بیولوژیکی (بدلیل کوتاه بودن برد آنها در بافتهای بدن) مهمترین نقش را در زنجیره واپاشی رادن ایفا می کنند.

مقادیر Potential Alpha Energy در جدول (۲-۴) آورده شده است.

۲-۳-۱-۳- غلظت انرژی پتانسیل آلفا (PAEC) Potential Alpha Energy concentration :

غلظت انرژی پتانسیل آلفایی (PAEC) عبارت است از مجموعه همه انرژی پتانسیل آلفایی موجود در هوا، تقسیم بر حجم هوای محتوی آنها، واحد معمول آن Jm^{-1} است که با نماد C_p نمایش داده میشود، همچنین گاهی از واحد $MevL^{-1}$ نیز استفاده می شود، نسبت انرژی پتانسیل بر واحد اکتیویته و همچنین انرژی پتانسیل کل به ازای هر بکرل برابر است با نسبت ϵ_p بر λ ، ثابت واپاشی λ معادل است با $0.693/T_{1/2}$ که همان واپاشی یا اکتیویته تقسیم بر تعداد آنها ϵ_p نیز انرژی پتانسیل آلفا تقسیم بر تعداد آنهاست، مقدار ϵ_p/λ برای اتمهای مختلف در جدول (۲-۵) آمده است. اگر $C_{p,i}$ غلظت فعالیت یکی از هسته های دختر در هوا باشد در این صورت PAEC برابر است با

$$C_p = \sum_i C_{p,i} = \sum_i C_{a,i} (\epsilon_{p,i} / \lambda_i)$$

۲-۳-۱-۴- غلظت معادل حالت تعادل Equilibrium-Equivalent Concentration :

در اغلب مواقع حالت تعادل بین هسته های والد رادن و دختران آن بوجود نمی آید و نیاز به بودن یک کمیت جداگانه برای تشریح غلظت اکتیویته چنین مجموعه های نامتعادل از آنها احساس میشود، این کمیت، غلظت معادل حالت تعادل است که با EC نشان داده می شود، EC برای یک مخلوط نامتعادل از دختران کوتاه عمر در هوا، عبارت است از آن مقدار غلظت اکتیویته گاز والد که از لحاظ رادیواکتیو در تعادل رادیواکتیو است با غلظتی از دختران کوتاه عمرش که دارای PAEC، (C_p) یکسان با PAEC مخلوط نا پایدار میباشد، واحد EC، Bqm^{-3} است، بسیار مهم است همواره این مطلب را مد نظر قرار دهیم که تنها واپاشی آلفایی دختران رادن (ونه فقط خود رادن) منظور میشود، که دلیل آن هم این اهمیت رادیوبیولوژیکی این واپاشی است، استفاده از یک مثال می تواند برای تفهیم EC موثر باشد، میتوانیم یک مورد خاص را نظر بگیریم که مجموعه ای از دختران رادن آن را تشکیل داده اند، شروع آن با واپاشی مقداری ^{222}Rn خالص با اکتیویته $10 Bqm^{-3}$ همراه است، پس از گذشت شصت دقیقه یک مجموعه نامتعادل (عدم تعادل بین رادن و دختران آن) با مشخصات زیر حاصل می شود: