

شیمی و آنالیز رادیونوکلیدها

«روش‌های آزمایشگاهی و شیوه‌ی آموزش»

ترجمه

سیمیندخت شیروانی آرائی

(عضویت علمی)

محمد قنادی مراغه

(عضویت علمی و استاد رادیوشیمی)

Xiaolin Hou Jukka Lehto، یوکا لهتو، ژالین هو ۲۰۱۰

شیمی و آنالیز رادیونوکلیدها «روش های آزمایشگاهی و شیوهی آموزش»/

مترجمین: سیمیندخت شیروانی آرانی، محمد قنادی مراغه

تهران: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۳۹۴.

۵۴۱ ص، مصور، جدول، نمودار.

ISBN: ۹۷۸-۶۰۰-۷۴۱۴-۱۱-۸

فهرست نویسی براساس اطلاعات فیبا

عنوان اصلی: شیمی و آنالیز رادیونوکلیدها «روش های آزمایشگاهی و شیوهی آموزش»

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

شماره‌ی کتابشناسی ملی: ۳۷۸۴۱۸۲

نام کتاب: شیمی و آنالیز رادیونوکلیدها «روش های آزمایشگاهی و شیوهی آموزش»

مترجمین: سیمیندخت شیروانی آرانی، محمد قنادی مراغه

ویراستار ادبی و فنی: مهدیه السادات عامل ابراهیمی

ویرایش صفحه‌بندی: شادی معماری آذر

ناظر چاپ: فریا علی اکبری

حروف‌چینی: آرزو محمدی، مریم رحیمی

تیراژ: ۱۰۰۰ جلد

چاپ: ۱۳۹۴

نوبت چاپ: اول

قیمت: ۲۵۰۰۰۰ ریال

ناشر: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

چاپ و صحافی: پیام رسان فردا ایرانیان، تلفن: ۸۸۷۲۸۰۰۲

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۴۱۴-۱۱-۸



کلیه‌ی حقوق چاپ و انتشار این اثر متعلق به پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای است.

پیش‌گفتار مؤلف

در سال ۲۰۰۱ یک دوره سخنرانی آموزشی در مورد آنالیز رادیونوکلیدها برای دانشجویان شیمی هسته‌ای ارائه دادم. دو مشکل به سرعت پدیدار شد. اولین مشکل این بود که اگر شخصی از شیمی رفتار رادیونوکلید در روش‌های جداسازی آگاه نبود امکان آموزش مناسب نیز در این زمینه وجود نداشت. بنابراین اگر مفهوم هیدرولیز فلزات مشخص نمی‌شد، هیچ درکی از مطالب در مورد رسوب فلزات هیدرولیز شونده، مثلاً با هیدروکسید آهن، به وجود نمی‌آمد. در این صورت باید به اطلاعات پایه‌ای بازگشته و شیمی عناصر را تدریس می‌کردم. این بازگشت گزینه‌ی خوبی بود؛ اما نه برای خودم. چون باید دانش خود را در زمینه‌ی شیمی پایه بروزرسانی می‌کردم. مشکل دوم این بود که منابع درسی کافی نیز در مورد شیمی رادیونوکلیدها در دسترس نبود. جزوه‌ای از یکی از اساتید قدیمی خود داشتم که در اختیار دانشجویان قرار دادم. این جزوه در سال ۱۹۷۰ نوشته شده بود و منبع خوبی به نظر می‌رسید. با این حال قدیمی و بسیار کوتاه بود. اکثر کتاب‌های رادیوشیمی موجود با این که به اندازه‌ی کافی مشروح بودند، اطلاعات کمی از شیمی واقعی رادیونوکلید را دربر داشته و بیش‌تر، فرایندهای فروپاشی رادیواکتیو، آشکارسازی و سنجش تابش را مورد توجه قرار داده بودند. در سال ۲۰۰۵ نوشتن متنی به زبان فنلاندی را آغاز کردم. سپس با مشاهده‌ی نیاز گسترده به چنین متنی، تصمیم گرفتم آن را به زبان انگلیسی نیز ترجمه کنم. پس از کار بر روی کتاب به مدت سه سال متوجه شدم اگر شخصی خودش در آنالیز درگیر نباشد، نمی‌تواند روش‌های تجزیه‌ای آنالیز را به خوبی توضیح دهد، همان‌طور که در مورد خودم صادق بود. به همین دلیل از دکتر ژالین‌هو، از آزمایشگاه ملی ریزوی دانمارک، درخواست کردم تا در این پروژه به من بپیوندد. من او را به عنوان با تجربه‌ترین متخصص شیمی هسته‌ای تجزیه‌ای می‌شناسم که شخصاً تعداد بسیار زیادی از رادیونوکلیدها را در نمونه‌های محیطی و پسماند هسته‌ای آنالیز کرده و روش‌های جداسازی جدیدی را نیز توسعه داده است. در طول دو سال گذشته طی نوشتن این کتاب همکاری داشتیم و من مطالب جدید زیادی آموختم، نه فقط از خواندن مقالات، بلکه از بحث‌های گسترده‌ای که با دکتر هو داشتم.

کتاب حاضر شیمی پایه‌ای مورد نیاز برای درک رفتار و تجزیه و تحلیل رادیونوکلیدهای اغلب عناصر و روش‌های تجزیه‌ای مورد نیاز برای جداسازی مهم‌ترین رادیونوکلیدها با فروپاشی آلفا و بتا را در نمونه‌های محیطی و پسماند هسته‌ای توضیح می‌دهد. (برای مثال، ^{90}Sr و ایزوتوپ‌های پلوتونیم). در دهه - پانزده سال اخیر بسیاری از رادیونوکلیدهای جدید در رادیوشیمی اهمیت یافته‌اند. اغلب آن‌ها طول عمر بلندی داشته و در سوخت هسته‌ای و ساختارهای راکتور هسته‌ای پدیدار شده‌اند و با آنالیز ایمنی دورریزی نهایی سوخت هسته‌ای و انهدام زباله‌های هسته‌ای در ارتباط هستند. به دلیل اکتیویته‌ی ویژه‌ی پایین این رادیونوکلیدها روش‌های طیف‌سنجی جرمی برای سنجش آن‌ها بسیار مناسب است (^{135}Cs ، ^{129}I و ...). پیشتر برای سنجش رادیونوکلیدها معمولاً از روش‌های رادیومتری استفاده می‌شد؛ اما با توسعه‌ی روش‌های طیف‌سنجی جرمی مسیر جدیدی برای آنالیز رادیونوکلیدها به ویژه در غلظت‌های پایین فراهم آمد. اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی جرمی هم‌چنین الزامات جدیدی برای آنالیز رادیونوکلیدها ایجاد کرد، زیرا رادیونوکلیدهای مزاحم و سایر رادیونوکلیدهایی که لازم است پیش از سنجش جداسازی شوند عمدتاً آن‌هایی نیستند که سنجش‌های رادیومتری را تحت تأثیر قرار می‌دادند.

هدف اصلی من نوشتن کتابی برای دانشجویان مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد بود؛ اما اکنون که نوشتن آن به پایان رسیده است، به نظر می‌رسد این کتاب به عنوان راهنما برای شیمی‌دان‌های هسته‌ای با تجربه‌تر نیز قابل استفاده است، حداقل امیدوارم این‌طور باشد.

یکم نوامبر ۲۰۱۰

یوکا سئو

استاد تمام رادیوشیمی

دانشگاه ملی

کره‌ی جنوبی

فیلان

پیش‌کفاز مترجمین

بی‌شک افزایش دانش و آگاهی از جهان هستی و رویدادهای جاری در آن شکوه و عظمت پروردگار جهانیان را هرچه بیشتر نمایان ساخته و زایش نور ایمان شایسته و بایسته را در دل انسان‌ها در پی دارد. در اثر حاضر، تلاش بر این بوده است گامی هر چند کوچک در این مسیر برداشته شود. متن حاضر برگردان منبعی است که پیشتر برای تأمین نیاز دانشجویان رشته‌ی هسته‌ای به دانش شیمی به رشته‌ی تحریر در آمده است تا با دید بازتری در زمینه‌ی کاری خود به تحقیق و مطالعه بپردازند. هدف از ترجمه‌ی این کتاب تهیه‌ی منبعی برای دانشجویان و محققان فعال در فناوری هسته‌ای به ویژه زمینه‌ی شیمی هسته‌ای و رادیوشیمی است تا با ویژگی‌های خاص رادیونوکلیدهای مختلف آشنایی بیشتری کسب کنند. عملیاتی کردن دانش شیمی در زمینه‌ی آمایش رادیونوکلیدها مستلزم آگاهی نسبتاً بالایی از رفتار آن‌ها در فرایندهای مختلف است. اگرچه تشریح این خصوصیات و رفتارها مب‌ح‌ثی گسترده است که به طور کامل در این حجم از اطلاعات نمی‌گنجد، با این حال سعی شده است موضوع یادشده تا حد امکان پوشش داده شود. تجربه‌ی همکاری با محققان گرایش‌های مختلف رشته‌ی هسته‌ای نشان داده است، افزایش آگاهی از خصوصیات شیمیایی رادیونوکلیدها تأثیر بسزایی روی بهبود عملکرد ایشان دارد. امید است مورد استفاده‌ی این عزیزان و سایر علاقمندان قرار گیرد. مانند هر متن دیگری این اثر نیز خالی از اشکال نخواهد بود، لذا از نظرات اصلاحی خود ما را بی‌نصیب نگذارید.

به فرموده‌ی امیرالمؤمنین (ع):

«آفت دانش به کار نبستن آن و آفت کار عدم دلبستگی به آن است.»

به امید روزی که اندیشمندان گران‌قدر عرصه‌های مختلف فناوری کشورمان با به‌کارگیری تمام عیار دانسته‌های خود برای رساندن این مرز و بوم به قله‌های پرافتخار خودکفایی و استقلال عاشقانه و خالصانه گام بردارند.

سیمین‌خت شیروانی آرانی

محمد قنادی مرافه

فروردین ۹۴

۱-۱-۱ رادیو نوکلیدها و اندازه‌گیری رادیومتری آنها	۱
۱-۱-۱ رادیو نوکلیدها	۱
۱-۱-۱ رادیو نوکلیدهای طبیعی	۲
۱-۱-۲ رادیو نوکلیدهای مصنوعی	۶
۲-۱ روش‌های فروپاشی رادیواکتیو	۸
۱-۲-۱ شکافت	۸
۲-۲-۱ فروپاشی آلفا	۱۱
۳-۲-۱ فروپاشی بتا	۱۳
۴-۲-۱ گذار داخلی	۱۶
۳-۱ آشکارسازی و اندازه‌گیری تابش	۱۹
۱-۳-۱ آشکارسازهای یونیزاسیون گازی	۱۹
۲-۳-۱ شمارش سنتیلاسیون (سوسوزن) مایع (LSC)	۲۲
۳-۳-۱ آشکارسازهای سنتیلاسیون جامد	۲۷
۴-۳-۱ آشکارسازهای نیمه هادی	۲۸
۵-۳-۱ خلاصه‌ی روش‌های رادیومتری	۳۰

خصوصیات ویژه شیمی رادیو نوکلیدها و جداسازی آنها	۳۵
۱-۲ مقادیر کم	۳۵
۲-۲ جذب سطحی	۳۷
۳-۲ استفاده از همراه‌برها	۳۹
۴-۲ کاربرد تابش در تعیین رادیو نوکلیدها	۴۳
۵-۲ در نظر گرفتن زمان سپری‌شده	۴۳
۶-۲ تغییرات حاصل از تابش و فروپاشی در سیستم	۴۴
۷-۲ ضرورت جداسازی‌های رادیوشیمیایی	۴۴

- عوامل مؤثر در اشکال شیمیایی رادیونوکلیدها در محلول های آبی ۴۹
- ۱-۳ pH محلول ۵۰
- ۲-۳ پتانسیل احیا و اکسایش (ردوکس) ۵۴
- ۳-۳ گازهای محلول ۵۹
- ۱-۳-۳ اکسیژن ۶۰
- ۲-۳-۳ دی اکسید کربن ۶۱
- ۴-۳ لیگندهای تشکیل دهنده ی کمپلکس با فلزات ۶۵
- ۵-۳ مواد خاکی (Humic) ۶۷
- ۶-۳ ذرات کلوییدی ۶۹
- ۷-۳ منابع و غلظت رادیونوکلیدها ۷۰
- ۸-۳ ضمیمه: عوامل به کار رفته برای تنظیم حالات اکسایش رادیونوکلیدها ۷۳
- ۱-۸-۳ اکسیدکننده ها ۷۳
- ۲-۸-۳ احیاکننده ها ۷۴

- روش های جداسازی ۷۷
- ۱-۴ ته نشینی ۷۷
- ۲-۴ محصول انحلال ۸۰
- ۱-۲-۴ هم رسوبی ۸۰
- ۲-۲-۴ اهداف ته نشینی ۸۲
- ۱-۲-۲-۴ ته نشینی های ویژه برای رادیونوکلیدهای مورد مطالعه ۸۲
- ۲-۲-۲-۴ ته نشینی های گروهی برای پیش تغلیظ رادیونوکلید هدف ۸۳
- ۳-۲-۲-۴ ته نشینی های گروهی برای حذف رادیونوکلیدهای مداخله گر و عناصر پایدار ۸۴
- ۳-۴ تبادل یونی ۸۷
- ۱-۳-۴ رزین های مبادله کننده ی یونی ۸۷
- ۲-۳-۴ ضریب توزیع و انتخاب ۸۹
- ۳-۳-۴ تبادل کاتیونی یا تبادل آنیونی؟ ۸۹
- ۴-۳-۴ کروماتوگرافی تبادل یونی ۹۳
- ۵-۳-۴ تبادل یونی و جداسازی اکتینید ۹۳
- ۴-۴ استخراج با حلال ۹۶

- ۹۶..... ۴-۴-۱ کمپلکس‌های قابل استخراج
- ۹۸..... ۴-۴-۲ ثابت توزیع و نسبت توزیع
- ۹۹..... ۴-۴-۳ مثال‌هایی در رابطه با استفاده از استخراج با حلال در جداسازی‌های رادیوشیمیایی
- ۱۰۰..... ۴-۵-۵ کروماتوگرافی استخراجی
- ۱۰۰..... ۴-۵-۱ مبنای کروماتوگرافی استخراجی
- ۱۰۱..... ۴-۵-۲ رزین‌های کروماتوگرافی استخراجی
- ۱۰۲..... ۴-۵-۳ رزین‌های Sr و Pb
- ۱۰۳..... ۴-۵-۴ کاربرد کروماتوگرافی استخراجی در جداسازی‌های اکتینید

۵

- ۱۰۹..... اندازه‌گیری‌های بهره و تهیهی چشمه‌ی شمارش
- ۱۰۹..... ۵-۱-۱ اندازه‌گیری بهره‌ی شیمیایی در تجزیه‌ی رادیوشیمیایی
- ۱۱۰..... ۵-۱-۱-۱ به‌کار بردن همراه‌های ایزوتوپ پایدار در اندازه‌گیری بهره
- ۱۱۱..... ۵-۱-۲ استفاده از ردیاب‌های رادیواکتیو در اندازه‌گیری بهره
- ۱۱۴..... ۵-۲-۲ تهیهی چشمه برای شمارش آلفا
- ۱۱۴..... ۵-۲-۱-۲ تهیهی چشمه برای گسیلنده‌های گاما
- ۱۱۶..... ۵-۲-۲-۲ تهیهی نمونه برای LSC
- ۱۱۸..... ۵-۲-۳-۲ تهیهی چشمه برای طیف‌سنجی آلفا با آشکارسازی‌های نیمه هادی و برای شمارش بتا با شمارش‌گرهای تناسبی
- ۱۱۹..... ۵-۲-۳-۱-۲ ته‌نشست الکتریکی
- ۱۲۰..... ۵-۲-۳-۲ هم‌رسوبی میکرونی
- ۱۲۰..... ۵-۲-۳-۳ ته‌نشست خود به خودی
- ۱۲۰..... ۵-۳-۲ مبنای تعیین بهره‌ی شیمیایی و تهیهی چشمه‌ی شمارش
- ۱۲۰..... ۵-۳-۱ تعیین بهره
- ۱۲۱..... ۵-۳-۲ آماده‌سازی چشمه‌ی شمارش

۶

- ۱۲۳..... رادیوشیمی فلزات قلیایی
- ۱۲۳..... ۶-۱ مهم‌ترین رادیونوکلیدهای فلزات قلیایی
- ۱۲۴..... ۶-۲ خواص شیمیایی فلزات قلیایی
- ۱۲۵..... ۶-۳ ضرورت جداسازی رادیونوکلیدهای فلزات قلیایی

۱۲۶	۴-۶ پتاسیم - ^{40}K
۱۲۶	۵-۶ سزیم - ^{134}Cs ، ^{135}Cs و ^{137}Cs
۱۲۶	۱-۵-۶ منابع و ویژگی‌های هسته‌ای.....
۱۲۹	۲-۵-۶ پیش تغلیظ نوکلیدهای سزیم از آب‌های طبیعی.....
۱۳۰	۳-۵-۶ اندازه‌گیری ^{135}Cs
۱۳۰	۱-۳-۵-۶ اندازه‌گیری ^{135}Cs به روش آنالیز فعال‌سازی نوترونی.....
۱۳۱	۲-۳-۵-۶ اندازه‌گیری ^{135}Cs به وسیله طیف‌سنج جرمی.....
۱۳۳	۶-۶ ملزومات در رادیوشیمی فلزات قلیایی.....

۷

۱۳۵	رادیوشیمی فلزات قلیایی خاکی.....
۱۳۵	۱-۷ مهم‌ترین رادیونوکلیدهای فلزات قلیایی خاکی.....
۱۳۶	۲-۷ خواص شیمیایی فلزات قلیایی خاکی.....
۱۳۹	۳-۷ بریلیم، ^9Be و ^{11}Be
۱۴۰	۴-۷ کلسیم ^{40}Ca و ^{45}Ca
۱۴۱	۱-۴-۷ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری.....
۱۴۰	۲-۴-۷ اندازه‌گیری ^{40}Ca و ^{45}Ca در بتن.....
۱۴۵	۵-۷ استرنسیم - ^{89}Sr و ^{90}Sr
۱۴۵	۱-۵-۷ ویژگی‌های هسته‌ای و منابع.....
۱۴۶	۲-۵-۷ اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های استرنسیم.....
۱۴۷	۱-۲-۵-۷ اندازه‌گیری اکتیویته ^{90}Sr
۱۴۸	۲-۲-۵-۷ تعیین هم‌زمان ^{89}Sr و ^{90}Sr
۱۴۸	۳-۵-۷ جداسازی‌های رادیوشیمیایی ^{89}Sr و ^{90}Sr
۱۴۹	۱-۳-۵-۷ اندازه‌گیری بهره‌ی شیمیایی در جداسازی رادیواسترنسیم.....
۱۵۰	۲-۳-۵-۷ جداسازی رادیواسترنسیم به وسیله روش ته‌نشینی نیترات.....
۱۵۳	۳-۳-۵-۷ جداسازی رادیواسترنسیم به وسیله روش ته‌نشینی $\text{Ca}(\text{OH})_2$
۱۵۵	۴-۳-۵-۷ جداسازی رادیواسترنسیم به وسیله کروماتوگرافی استخراجی.....
۱۵۸	۶-۷ رادیم - ^{226}Ra و ^{228}Ra
۱۵۸	۱-۶-۷ ویژگی‌های هسته‌ای ایزوتوپ‌های رادیم.....
۱۵۹	۲-۶-۷ اندازه‌گیری اکتیویته‌ی ایزوتوپ‌های رادیم.....
۱۶۱	۳-۶-۷ لزوم اندازه‌گیری اکتیویته‌ی ایزوتوپ‌های رادیم.....

- ۱۶۲.....جداسازی‌های رادیوشیمیایی رادیم
- ۱۶۳.....جداسازی ^{226}Ra در نمونه‌های صخره با استفاده از تبادل یونی
- ۱۶۴.....اندازه‌گیری ^{226}Ra و ^{228}Ra در آب به روش کروماتوگرافی استخراجی
- ۱۶۵.....مبانی در رادیوشیمی فلزات قلیایی خاکی

۸

- ۱۶۷.....رادیو شیمی فلزات واسطه - $2d$
- ۱۶۷.....۱-۸ مهم‌ترین رادیونوکلیدهای فلزات واسطه - $2d$
- ۱۶۹.....۲-۸ خواص شیمیایی فلزات واسطه - $2d$
- ۱۷۰.....۳-۸ آهن - ^{55}Fe
- ۱۷۰.....۱-۳-۸ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{55}Fe
- ۱۷۱.....۲-۳-۸ شیمی آهن
- ۱۷۳.....۳-۳-۸ جداسازی ^{55}Fe
- ۱۷۴.....۱-۳-۳-۸ جداسازی ^{55}Fe به روش استخراج با حلال
- ۱۷۶.....۲-۳-۳-۸ جداسازی ^{55}Fe به روش کروماتوگرافی استخراجی
- ۱۷۷.....۴-۸ نیکل ^{63}Ni و ^{59}Ni
- ۱۷۷.....۱-۴-۸ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{63}Ni و ^{59}Ni
- ۱۷۸.....۲-۴-۸ شیمی نیکل
- ۱۷۸.....۳-۴-۸ جداسازی ^{63}Ni و ^{59}Ni
- ۱۷۹.....۱-۳-۴-۸ جداسازی نیکل به روش ته‌نشینی DMG
- ۱۸۰.....۲-۳-۴-۸ جداسازی ^{63}Ni به وسیله‌ی رزین Ni
- ۱۸۲.....۳-۳-۴-۸ جداسازی نیکل برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های نیکل با AMS
- ۱۸۳.....۴-۳-۴-۸ اندازه‌گیری هم‌زمان ^{63}Ni و ^{55}Fe
- ۱۸۵.....۵-۸ مبانی رادیوشیمی فلزات واسطه - $2d$

۹

- ۱۸۷.....رادیوشیمی فلزات واسطه - $4d$
- ۱۸۷.....۱-۹ رادیونوکلیدهای مهم فلزات واسطه - $4d$
- ۱۸۹.....۲-۹ شیمی فلزات واسطه - $4d$
- ۱۸۹.....۳-۹ تکنسیم - ^{99}Tc

۱۹۰	۱-۳-۹ شیمی تکسسیم
۱۹۱	۲-۳-۹ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{99}Tc
۱۹۲	۳-۳-۹ جداسازی ^{99}Tc
۱۹۳	۱-۳-۳-۹ اندازه‌گیری بهره در تجزیه‌ی ^{99}Tc
۱۹۴	۲-۳-۳-۹ غنی‌سازی ^{99}Tc برای تجزیه‌ی آب
۱۹۴	۳-۳-۳-۹ جداسازی ^{99}Tc از آب به ته‌نشینی و استخراج با حلال
۱۹۶	۴-۳-۳-۹ جداسازی ^{99}Tc به روش کروماتوگرافی استخراجی
۱۹۶	۵-۳-۳-۹ جداسازی ^{99}Tc به روش تقطیر
۱۹۷	۴-۹ زیرکونیم - ^{90}Zr
۱۹۷	۱-۴-۹ شیمی زیرکونیم
۱۹۹	۲-۴-۹ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{90}Zr
۲۰۰	۳-۴-۹ جداسازی ^{90}Zr
۲۰۰	۱-۳-۴-۹ اندازه‌گیری ^{90}Zr به وسیله‌ی استخراج با TTA و اندازه‌گیری با LSC
۲۰۲	۲-۳-۴-۹ جداسازی ^{90}Zr با استفاده از هم‌رسوبی و استخراج حلالی برای سنجش Zr با ICP-MS
۲۰۳	۵-۹ مولیبدن - ^{98}Mo
۲۰۳	۱-۵-۹ شیمی مولیبدن
۲۰۵	۲-۵-۹ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{98}Mo
۲۰۷	۳-۵-۹ جداسازی ^{98}Mo
۲۰۷	۱-۳-۵-۹ جداسازی مولیبدن رادیواکتیو به وسیله‌ی اکسید آلومینیم
۲۰۷	۲-۳-۵-۹ جداسازی ^{98}Mo به وسیله‌ی استخراج با حلال
۲۰۹	۶-۹ نیوبیم - ^{93}Nb
۲۰۹	۱-۶-۹ شیمی نیوبیم
۲۱۱	۲-۶-۹ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری رادیونوکلیدهای نیوبیم
۲۱۲	۳-۶-۹ جداسازی ^{93}Nb
۲۱۲	۱-۳-۶-۹ جداسازی ^{93}Nb به وسیله‌ی ته‌نشینی به صورت Nb_2O_5
۲۱۳	۲-۳-۶-۹ جداسازی ^{93}Nb به وسیله‌ی ته‌نشینی Nb_2O_5 و تبادل آنیونی
۲۱۳	۳-۳-۶-۹ جداسازی ^{93}Nb به وسیله‌ی استخراج با حلال
۲۱۵	۷-۹ مبانی رادیوشیمی فلزات واسطه - $4d$

۲۱۷	۱-۱۰ رادیونوکلیدهای مهم سری لاتانیدها
۲۱۸	۲-۱۰ خواص شیمیایی لاتانیدها
۲۱۹	۳-۱۰ جداسازی لاتانیدها از اکتینیدها
۲۲۰	۴-۱۰ لاتانیدها مشابه اکتینیدها
۲۲۲	۵-۱۰ ^{147}Pm و ^{151}Sm
۲۲۲	۱-۵-۱۰ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{147}Pm و ^{151}Sm
۲۲۳	۲-۵-۱۰ جداسازی ^{147}Pm و ^{151}Sm
۲۲۳	۱-۲-۵-۱۰ جداسازی با رزین Ln
۲۲۵	۲-۲-۵-۱۰ اندازه‌گیری ^{147}Pm از ادرار با استفاده از کروماتوگرافی تبادل یونی
۲۲۷	۳-۲-۵-۱۰ جداسازی ^{147}Pm از سوخت پرتودیده به وسیله کروماتوگرافی تبادل یونی
۲۲۷	۴-۲-۵-۱۰ اندازه‌گیری ^{147}Pm و ^{151}Sm در صخره‌ها
۲۲۹	۶-۱۰ مبانی رادیوشیمی لاتانیدها

۲۳۱	رادیوشیمی هالوزن‌ها
۲۳۱	۱-۱۱ رادیونوکلیدهای مهم هالوزن
۲۳۳	۲-۱۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هالوزن‌ها
۲۳۴	۳-۱۱ کلر- ^{36}Cl
۲۳۴	۱-۳-۱۱ منابع و ویژگی‌های هسته‌ای ^{36}Cl
۲۳۶	۲-۳-۱۱ اندازه‌گیری ^{36}Cl
۲۳۷	۱-۲-۳-۱۱ تعیین و اندازه‌گیری ^{36}Cl از فولاد، گرافیت و بتن به وسیله استخراج حلالی و تبادل یون
۲۳۹	۴-۱۱ ید- ^{129}I
۲۳۹	۱-۴-۱۱ منابع و ویژگی‌های هسته‌ای ^{129}I
۲۴۰	۲-۴-۱۱ اندازه‌گیری ^{129}I
۲۴۱	۱-۲-۴-۱۱ تعیین و اندازه‌گیری ^{129}I به وسیله تجزیه به روش فعال‌سازی
۲۴۳	۲-۲-۴-۱۱ تعیین و اندازه‌گیری ^{129}I به وسیله طیف‌سنج جرمی شتاب‌دهنده
۲۴۴	۳-۴-۱۱ جداسازی رادیو شیمیایی ^{129}I
۲۴۵	۱-۳-۴-۱۱ جداسازی ^{129}I به وسیله استخراج با حلال
۲۴۹	۲-۳-۴-۱۱ پیش‌آمایش نمونه‌ها برای تجزیه ^{129}I
۲۴۹	۳-۳-۴-۱۱ جداسازی گونه‌های ید در آب
۲۵۱	۵-۱۱ مبانی رادیوشیمی هالوزن

۲۵۳.....	رادیوشیمی گازهای بی اثر
۲۵۳.....	۱-۱۲ رادیونوکلیدهای مهم گازهای بی اثر
۲۵۴.....	۲-۱۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی گازهای بی اثر
۲۵۵.....	۳-۱۲ اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های Xe در هوا
۲۵۵.....	۴-۱۲ تعیین ^{85}Kr در هوا
۲۵۷.....	۵-۱۲ رادون و اندازه‌گیری آن
۲۵۸.....	۱-۵-۱۲ تعیین و اندازه‌گیری رادون در هوای فضای باز و منفذهای خالی خاک
۲۵۸.....	۲-۵-۱۲ تعیین و اندازه‌گیری رادون در هوای داخل منزل
۲۵۹.....	۳-۵-۱۲ تعیین رادون در آب
۲۶۰.....	۶-۱۲ مبانی رادیوشیمی گاز بی اثر

۲۶۳.....	رادیوشیمی تریتیم و رادیوکربن
۲۶۴.....	۱-۱۳ تریتیم - ^3H
۲۶۴.....	۱-۱-۱۳ ویژگی‌های هسته‌ای تریتیم
۲۶۴.....	۲-۱-۱۳ منابع محیطی تریتیم
۲۶۵.....	۳-۱-۱۳ تعیین و اندازه‌گیری تریتیم در آب
۲۶۶.....	۴-۱-۱۳ غنی‌سازی الکترولیتی تریتیم
۲۶۷.....	۵-۱-۱۳ تعیین و اندازه‌گیری تریتیم در ماده‌ی آلی
۲۶۸.....	۶-۱-۱۳ تعیین تریتیم در ادرار
۲۶۸.....	۷-۱-۱۳ تعیین تریتیم پس از تبدیل به بنزن
۲۶۸.....	۸-۱-۱۳ تعیین تریتیم با استفاده از طیف‌سنج جرمی
۲۷۰.....	۹-۱-۱۳ تعیین تریتیم در نمونه‌های پسماند هسته‌ای
۲۷۱.....	۲-۱۳ رادیوکربن - ^{14}C
۲۷۱.....	۱-۲-۱۳ ویژگی‌های هسته‌ای رادیوکربن
۲۷۱.....	۲-۲-۱۳ منابع رادیوکربن
۲۷۲.....	۳-۲-۱۳ شیمی کربن معدنی
۲۷۳.....	۴-۲-۱۳ سالیابی کربن نمونه‌های کربن‌دار
۲۷۴.....	۵-۲-۱۳ جداسازی و اندازه‌گیری ^{14}C
۲۷۵.....	۱-۵-۲-۱۳ حذف کربن از نمونه‌ها با احتراق برای اندازه‌گیری ^{14}C

۲۷۶.....	۱۳-۲-۵ تعیین ^{14}C به صورت کربنات کلسیم با LSC
۲۷۷.....	۱۳-۲-۵ تعیین ^{14}C به وسیله LSC با کربن پیوند خورده به آمین
۲۷۷.....	۱۳-۲-۵ تعیین ^{14}C به وسیله LSC در بنزن
۲۷۹.....	۱۳-۲-۵ تعیین ^{14}C در گرافیت به وسیله AMS
۲۷۹.....	۱۳-۲-۶ تعیین ^{12}C در پسماند هسته‌ای
۲۸۰.....	۱۳-۳ مبانی رادیوشیمی تریتم و رادیوکربن

۱۴

۲۸۳.....	رادیوشیمی سرب، پولونیم و سلنیم
۲۸۵.....	۱-۱۴ پولونیم- ^{210}Po
۲۸۵.....	۱-۱-۱۴ ویژگی‌های هسته‌ای ^{210}Po
۲۸۶.....	۲-۱-۱۴ شیمی پولونیم
۲۸۷.....	۳-۱-۱۴ تعیین ^{210}Po
۲۹۰.....	۲-۱۴ سرب- ^{210}Pb
۲۹۰.....	۱-۲-۱۴ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{210}Pb
۲۹۱.....	۲-۲-۱۴ شیمی سرب
۲۹۲.....	۳-۲-۱۴ تعیین و اندازه‌گیری ^{210}Pb
۲۹۳.....	۱-۳-۲-۱۴ تعیین ^{210}Pb از رشد داخلی
۲۹۴.....	۲-۳-۲-۱۴ جداسازی ^{210}Pb به وسیله ته‌نشینی
۲۹۶.....	۳-۳-۲-۱۴ جداسازی ^{210}Pb به وسیله کروماتوگرافی استخراجی
۲۹۸.....	۳-۱۴ قلع ^{116}Sn
۲۹۸.....	۱-۳-۱۴ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{116}Sn
۲۹۹.....	۲-۳-۱۴ شیمی قلع
۳۰۰.....	۳-۳-۱۴ تعیین ^{116}Sn
۳۰۳.....	۴-۱۴ سلنیم- ^{76}Se
۳۰۳.....	۱-۴-۱۴ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{76}Se
۳۰۴.....	۲-۴-۱۴ شیمی سلنیم
۳۰۶.....	۳-۴-۱۴ تعیین ^{76}Se
۳۰۸.....	۵-۱۴ مبانی رادیوشیمی پولونیم، سرب، قلع و سلنیم

۳۱۱.....	راد یوشیمی اکتینیدها
۳۱۲.....	۱-۱۵ ایزوتوپ‌های مهم اکتینید
۳۱۳.....	۲-۱۵ تولید و مبدا اکتینیدها
۳۱۸.....	۳-۱۵ ساختار الکترونی اکتینیدها
۳۲۰.....	۴-۱۵ حالات اکسایش اکتینیدها
۳۲۰.....	۵-۱۵ شعاع‌های یونی اکتینیدها
۳۲۲.....	۶-۱۵ شکل‌های شیمیایی اصلی اکتینیدها
۳۲۳.....	۷-۱۵ تجزیه
۳۲۴.....	۸-۱۵ هیدرولیز و پلیمریزاسیون اکتینیدها
۳۲۶.....	۹-۱۵ تشکیل کمپلکس اکتینیدها
۳۲۷.....	۱۰-۱۵ اکسیدهای اکتینیدها
۳۲۷.....	۱۱-۱۵ اکتینیم
۳۲۷.....	۱-۱۱-۱۵ ایزوتوپ‌های اکتینیم
۳۲۹.....	۲-۱۱-۱۵ شیمی اکتینیم
۳۳۰.....	۳-۱۱-۱۵ جداسازی اکتینیم
۳۳۱.....	۴-۱۱-۱۵ مبانی رادیوشیمی اکتینیم
۳۳۲.....	۱۲-۱۵ توریم
۳۳۲.....	۱-۱۲-۱۵ فراوانی توریم
۳۳۲.....	۲-۱۲-۱۵ ایزوتوپ‌های توریم و اندازه‌گیری آن‌ها
۳۳۵.....	۳-۱۲-۱۵ شیمی توریم
۳۳۶.....	۴-۱۲-۱۵ جداسازی توریم
۳۳۶.....	۱-۴-۱۲-۱۵ جداسازی توریم با ته‌نشینی
۳۳۶.....	۲-۴-۱۲-۱۵ جداسازی توریم به روش تبادل آنیونی
۳۳۷.....	۳-۴-۱۲-۱۵ جداسازی توریم به روش استخراج با حلال
۳۳۷.....	۴-۴-۱۲-۱۵ جداسازی توریم به روش کروماتوگرافی استخراجی
۳۳۷.....	۵-۱۲-۱۵ مبانی رادیوشیمی توریم
۳۳۹.....	۱۳-۱۵ پروتاکتینیم
۳۳۹.....	۱-۱۳-۱۵ ایزوتوپ‌های پروتاکتینیم
۳۴۰.....	۲-۱۳-۱۵ شیمی پروتاکتینیم
۳۴۱.....	۳-۱۳-۱۵ جداسازی پروتاکتینیم
۳۴۳.....	۴-۱۳-۱۵ مبانی رادیوشیمی پروتاکتینیم

۳۴۳	 ۱۴-۱۵ اورانیم
۳۴۴	 ۱-۱۴-۱۵ مهم‌ترین ایزوتوپ‌های اورانیم
۳۴۷	 ۲-۱۴-۱۵ فراوانی اورانیم
۳۴۷	 ۳-۱۴-۱۵ شیمی اورانیم
۳۵۰	 ۴-۱۴-۱۵ هیدرولیز اورانیم
۳۵۱	 ۵-۱۴-۱۵ تشکیل کمپلکس‌های اورانیم
۳۵۲	 ۶-۱۴-۱۵ اکسیدهای اورانیم
۳۵۲	 ۷-۱۴-۱۵ از معدن تا سوخت اورانیمی
۳۵۳	 ۸-۱۴-۱۵ اندازه‌گیری اورانیم
۳۵۴	 ۹-۱۴-۱۵ دلایل تعیین و اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های اورانیم
۳۵۵	 ۱۰-۱۴-۱۵ جداسازی اورانیم
۳۵۶	 ۱-۱۰-۱۴-۱۵ جداسازی اورانیم از دیگر رادیونوکلیدهای طبیعی گسیلنده‌ی آلفا
۳۵۶	 ۲-۱۰-۱۴-۱۵ تعیین اشکال شیمیایی اورانیم در آب زیرزمینی
۳۵۷	 ۳-۱۰-۱۴-۱۵ جداسازی اورانیم از عناصر ترانس اورانیم به وسیله‌ی تبادل آنیونی یا به وسیله‌ی کروماتوگرافی استخراج
۳۵۷	 ۴-۱۰-۱۴-۱۵ جداسازی اورانیم به روش استخراج با حلال با تری‌بوتیل فسفات (TBP)
۳۵۸	 ۱۱-۱۴-۱۵ مبانی رادیوشیمی اورانیم
۳۵۹	 ۱۵-۱۵ نپتونیم
۳۵۹	 ۱-۱۵-۱۵ منابع نپتونیم
۳۶۱	 ۲-۱۵-۱۵ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{237}Np
۳۶۱	 ۳-۱۵-۱۵ شیمی نپتونیم
۳۶۳	 ۴-۱۵-۱۵ جداسازی ^{237}Np
۳۶۴	 ۱-۴-۱۵-۱۵ ردیاب‌های نپتونیم برای تعیین و اندازه‌گیری بهره
۳۶۶	 ۲-۴-۱۵-۱۵ پیش‌تغلیظ نپتونیم از حجم‌های بالای آب
۳۶۶	 ۳-۴-۱۵-۱۵ جداسازی ^{237}Np به روش کروماتوگرافی استخراجی
۳۶۸	 ۴-۴-۱۵-۱۵ جداسازی ^{237}Np به روش کروماتوگرافی تبادل آنیونی
۳۶۸	 ۵-۴-۱۵-۱۵ جداسازی ^{237}Np به روش استخراج با حلال
۳۶۹	 ۵-۱۵-۱۵ مبانی رادیوشیمی نپتونیم
۳۷۰	 ۱۶-۱۵ پلوتونیم
۳۷۰	 ۱-۱۶-۱۵ ایزوتوپ‌های پلوتونیم
۳۷۲	 ۲-۱۶-۱۵ منابع پلوتونیم
۳۷۵	 ۳-۱۶-۱۵ اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پلوتونیم

۳۷۷	 شیمی پلوتونیم ۴-۱۶-۱۵
۳۷۷	 ۱-۴-۱۶-۱۵ حالات اکسایش و پلوتونیم
۳۷۸	 تجزیه ۲-۴-۱۶-۱۵
۳۷۹	 ۳-۴-۱۶-۱۵ هیدرولیز
۳۸۰	 ۴-۴-۱۶-۱۵ رفتار احیا و اکسایش (ردوکس)
۳۸۱	 ۵-۴-۱۶-۱۵ تشکیل کمپلکس
۳۸۲	 ۵-۱۶-۱۵ جداسازی پلوتونیم
۳۸۳	 ۶-۱۶-۱۵ ردیاب‌های به کار رفته در تعیین ایزوتوپ‌های Pu
۳۸۴	 ۷-۱۶-۱۵ جداسازی به روش استخراج با حلال
۳۸۵	 ۸-۱۶-۱۵ جداسازی Pu به روش کروماتوگرافی تبادل آنیونی
۳۸۷	 ۹-۱۶-۱۵ جداسازی Pu به روش کروماتوگرافی استخراجی
۳۸۹	 ۱۰-۱۶-۱۵ جداسازی Pu از حجم‌های بالای آب
۳۹۱	 ۱۱-۱۶-۱۵ روش‌های خودکار و سریع برای تعیین Pu
۳۹۳	 ۱۲-۱۶-۱۵ مبانی رادیوشیمی پلوتونیم
۳۹۵	 ۱۷-۱۵ امرسیم و کوریم
۳۹۵	 ۱-۱۷-۱۵ منابع امرسیم و کوریم
۳۹۶	 ۲-۱۷-۱۵ ویژگی‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری ^{241}Am ، ^{242}Cm ، ^{243}Cm و ^{244}Cm
۳۹۸	 ۳-۱۷-۱۵ شیمی امرسیم و کوریم
۴۰۰	 ۴-۱۷-۱۵ جداسازی امرسیم و کوریم
۴۰۱	 ۱-۴-۱۷-۱۵ جداسازی Am و Cm به روش تبادل یونی
۴۰۲	 ۲-۴-۱۷-۱۵ جداسازی Am و Cm به روش کروماتوگرافی استخراجی
۴۰۲	 ۳-۴-۱۷-۱۵ جداسازی Am و Cm به روش استخراج با حلال
۴۰۳	 ۴-۴-۱۷-۱۵ جداسازی لانتانیدها از Am و Cm
۴۰۴	 ۵-۱۷-۱۵ مبانی رادیوشیمی امرسیم و کوریم

۴۰۷	 تجزیه‌ی گونه‌شناسی
۴۰۷	 ۱-۱۶ ملاحظات مرتبط با گونه‌شناسی
۴۰۹	 ۲-۱۶ اهمیت گونه‌شناسی
۴۱۰	 ۳-۱۶ گروه‌بندی تجزیه‌ی گونه‌شناسی
۴۱۱	 ۴-۱۶ روش‌های جزء به جزء سازی برای نمونه‌های محیطی

۴۱۲	۱۶-۴-۱ جزء به جزء سازی ذرات در آب
۴۱۴	۱۶-۴-۲ جزء به جزء سازی ذرات معلق در هوا
۴۱۵	۱۶-۴-۳ روش جزء به جزء سازی خاک و رسوبات
۴۱۶	۱۶-۵ آنالیز رادیونوکلیدها و ترکیبات ایزوتوپی
۴۱۷	۱۶-۶ روش های گونه شناسی طیفسنجی
۴۲۰	۱۶-۷ روش های شیمیایی تر
۴۲۰	۱۶-۷-۱ هم رسوبی
۴۲۱	۱۶-۷-۲ استخراج با حلال
۴۲۲	۱۶-۷-۳ کروماتوگرافی تبادل یونی
۴۲۳	۱۶-۸ استخراج های متوالی
۴۲۷	۱۶-۹ روش های گونه شناسی محاسباتی
۴۳۱	۱۶-۱۰ تعیین خصوصیات ذرات رادیواکتیو
۴۳۱	۱۶-۱۰-۱ شناسایی و جداسازی ذرات
۴۳۲	۱۶-۱۰-۲ تجزیه (آنالیز) به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی
۴۳۳	۱۶-۱۰-۳ تجزیه ی پرتوهای گاما و X ذرات
۴۳۴	۱۶-۱۰-۴ تجزیه ی ثانویه ی طیفسنجی جرمی یونی (SIMS) ذرات رادیواکتیو
۴۳۴	۱۶-۱۰-۵ تجزیه ی میکرونی پرتو X بر پایه ی سنکروترون
۴۳۸	۱۶-۱۰-۶ تجزیه پس از انحلال ذرات
۴۳۸	مطالعه بیش تر

۱۷

۴۳۹	اندازه گیری رادیونوکلیدها به وسیله ی طیفسنج جرمی
۴۳۹	۱۷-۱ مقدمه
۴۴۱	۱۷-۲ طیفسنج جرمی جفت شده با پلاسمای القایی (ICP-MS)
۴۴۱	۱۷-۲-۱ اجزا و مبانی عملیاتی سیستم های ICP-MS
۴۴۴	۱۷-۲-۲ تفکیک و حساسیت فراوانی
۴۴۷	۱۷-۲-۳ سلول های برخورد/ واکنش دینامیکی
۴۴۹	۱۷-۲-۴ آشکارسازها
۴۵۰	۱۷-۲-۵ حدود آشکارسازی
۴۵۳	۱۷-۲-۶ اندازه گیری ^{90}Sr به وسیله ی ICP-MS
۴۵۳	۱۷-۲-۷ اندازه گیری ^{99}Tc به وسیله ی ICP-MS

۴۵۴.....	۸-۲-۱۷ اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های اورانیم و توریم به وسیله‌ی ICP-MS
۴۵۵.....	۹-۲-۱۷ اندازه‌گیری ^{237}Np به وسیله‌ی ICP-MS
۴۵۵.....	۱۰-۲-۱۷ اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پلوتونیم به وسیله‌ی ICP-MS
۴۵۶.....	۳-۱۷ طیف‌سنج جرمی با شتاب‌دهنده‌ی (AMS)
۴۵۶.....	۱-۳-۱۷ اجزا و عملکرد AMS
۴۵۹.....	۲-۳-۱۷ اندازه‌گیری ^{14}C به وسیله‌ی AMS
۴۶۰.....	۳-۳-۱۷ اندازه‌گیری ^{36}Cl به وسیله‌ی AMS
۴۶۰.....	۴-۳-۱۷ اندازه‌گیری ^{41}Ca به وسیله‌ی AMS
۴۶۱.....	۵-۳-۱۷ اندازه‌گیری ^{63}Ni و ^{59}Ni به وسیله‌ی AMS
۴۶۲.....	۶-۳-۱۷ اندازه‌گیری ^{99}Tc به وسیله‌ی AMS
۴۶۲.....	۷-۳-۱۷ اندازه‌گیری ^{131}I به وسیله‌ی AMS
۴۶۳.....	۸-۳-۱۷ اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پلوتونیم به وسیله‌ی AMS
۴۶۴.....	۴-۱۷ طیف‌سنجی جرمی یونیزاسیون حرارتی (TIMS)
۴۶۶.....	۵-۱۷ طیف‌سنجی جرمی یونیزاسیون رزونانسی (RIMS)
۴۶۸.....	۶-۱۷ مبانی و اندازه‌گیری رادیونوکلیدها به وسیله‌ی طیف‌سنجی جرمی

۱۸

۴۷۱.....	نمونه‌برداری و پیش‌آمایش نمونه برای اندازه‌گیری رادیونوکلیدها
۴۷۱.....	۱-۱۸ مقدمه
۴۷۳.....	۲-۱۸ نمونه‌برداری هوایی و پیش‌آمایش
۴۷۳.....	۱-۲-۱۸ نمونه‌برداری ذرات معلق
۴۷۳.....	۱-۱-۲-۱۸ ذرات معلق رادیواکتیو
۴۷۴.....	۲-۱-۲-۱۸ نمونه‌برداری انتگرالی ذره‌ی معلق
۴۷۷.....	۳-۱-۲-۱۸ نمونه‌برداری اندازه‌ی گزینشی ذره‌ی آئروسول
۴۷۸.....	۴-۱-۲-۱۸ نمونه‌برداری ذره‌ی آئروسول Passive
۴۷۹.....	۳-۱۸ نمونه‌برداری ترکیبات گازی
۴۸۱.....	۴-۱۸ نمونه‌برداری ته‌نشینی اتمسفری
۴۸۱.....	۱-۴-۱۸ نمونه‌برداری ته‌نشینی خشک/ تر
۴۸۳.....	۲-۴-۱۸ جمع‌کننده‌ی تبادل یونی
۴۸۳.....	۵-۱۸ نمونه‌برداری آب
۴۸۴.....	۱-۵-۱۸ نمونه‌برداری آب سطحی

