

بررسی و مقایسه روشهای مختلف اندازه گیری اورانیوم در آب

محمد بنی نجاریان

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده تحقیقات و توسعه راکتورها و شتابدهنده ها، آدرس
پست الکترونیکی: baninajarian@entc.org.ir

چکیده

نورسنجی، نورسنجی لیزری، شمارش درخشش مایع (LSC^*)، طیف سنجی گاما و طیف سنجی آلفا برای تخمین غلظت اورانیوم در آبهای حاوی اورانیوم مورد استفاده قرار گرفته اند. روشهای شیمیائی بکار گرفته شده تغلیظ ابتدائی، استخراج مایع، استخراج رزینی با کروماتوگرافی و رسوبگیری بوده است. بررسی نتایج تجربی حاکی از این مطلب است که نورسنجی لیزری روشی دقیق و آسان به منظور تخمین غلظتهای پایین اورانیوم در حد میکرو گرم در لیتر است. نورسنجی لیزری برای غلظتهای بالاتر اورانیوم و آبهای دارای بافت پیچیده و تعیین مقدارهای ایزوتوپی کاربرد ندارد. نورسنجی کلاسیک یک روش مکمل بوده و مشکلات آنالیزی مربوط به غلظتهای بالاتر اورانیوم در حد بیش از ۱۰ میلی گرم در لیتر را رفع می کند. طیف سنجی آلفا و گاما دارای این مزیت است که قابلیت اندازه گیری دقیق ایزوتوپی را دارد ولی عیبش این است که آماده سازی شیمیائی آن سخت و زمان اندازه گیری آن روش نیز طولانی است. روش حد واسط، LSC است که دارای مشکل تخمین ایزوتوپی بوده و این مسئله ناشی از جداسازی ضعیف انرژی در این روش است.

واژه های کلیدی: نورسنجی لیزری، شمارش درخشش مایع، اورانیوم

* Liquid scintillation counting

۱. مقدمه

تعیین مقدار اورانیوم در آبهای اطراف سایت‌های هسته ای از اهمیت ویژه ای برخوردار است. معمولاً نمونه برداری آب از قسمتهای سطحی، زیرزمینی، معدنی، چاهها خصوصاً در مناطق نزدیک به معادن اورانیوم انجام میگردد. هدف از این مقاله بررسی و مقایسه قابلیت‌های پنج روش مختلف تعیین مقدار اورانیوم و محدوده های کاربرد آنها در مسائل زیست محیطی است.

۲. روشها و اندازه گیریها

روشهای مختلف اندازه گیری اورانیوم به دو گروه کلی اندازه گیری در محل "in situ" و روشهای آزمایشگاهی تقسیم بندی میشوند. مراحل روشهای آزمایشگاهی برای اندازه گیری اورانیوم شامل پیش تغلیظ یا تبخیر، اسیدی کردن، همرسوبی، تکلیس، جداسازی اسید یا کربنات، استخراج و آماده سازی برای اندازه گیری میباشد. در ابتدا هر نمونه برای اندازه گیری اکتیویته آلفا و بتا مورد ارزیابی قرار میگردد. اطلاعات حاصل از اینکار جهت انتخاب روش تعیین مقدار مورد استفاده قرار میگردد. پارامترهای دیگر در انتخاب روش مناسب، اطلاعات زمین شناسی و هیدرو-شیمیائی میباشد.

۱-۲. نورسنجی

U(IV) تشکیل یک کمپلکس قرمز رنگ با آرسنازو (III) در محیط کلرید ریک اسید 6N میدهد. در این شرایط U(VI) با احیا توسط روی در حضور آسکوربیک اسید به U(IV) تبدیل میشود. بیشترین جذب نور این کمپلکس در طول موج ۶۵۵ نانومتر است.

۲-۲. روش شمارش درخشش مایع (LSC)

دستور العمل شیمیائی براساس استخراج مایع-مایع و درخشش ترکیبی از دی-ایزوپروپیل نفتالن که با ۳۰۰ میلی لیتر تولوئن و ۶۰ میلی لیتر بیس (۲-اتیل هگزیل) فسفریک اسید (HDEHP) بعنوان عامل کمپلکس کننده میباشد. نمونه ها با نیتریک اسید در محدوده ۲-۳ pH اسیدی میشوند. رادیم توسط رسوبگیری قبل از استخراج جدا میشود. راندمان از طریق روش ردیابی (۵۰۰ میلی لیتر نمونه و ۵۰۰ میلی لیتر نمونه همراه با استاندارد اضافه شده) تعیین میگردد. معمولاً یک لیتر نمونه در این روش مورد استفاده قرار میگردد. هنگامیکه نمونه رنگی شد،

حجمهای کمتر انتخاب شده و سپس بمنظور به حداقل رسیدن خاموشی (quenching) به حجم یک لیتر می رسد. مقدار اورانیوم با استفاده از منحنی کالیبراسیون تعیین میگردد.

۳-۲. فلوریمتری لیزری

این روش براساس لومینسانس یون اورانیل در محلول است. برای افزایش راندمان ابتدائی از ماده شیمیائی فلوران استفاده میشود. قرائت سیگنال نمونه قبل و بعد از افزایش معرف شیمیائی انجام میگردد. سیگنال نمونه حاوی مقدار اورانیوم نامشخص با نمونه استاندارد مقایسه میشود. بمنظور اجتناب از تاثیر ساختار نمونه ، اندازه گیریها قبل و بعد از افزایش مقدار کم محلول استاندارد انجام میگردد. استفاده از روش اندازه گیری تفاضلی ، تصحیح زمینه را امکانپذیر می نماید. حجم نمونه متداول مورد استفاده در این روش ۰/۵ میلی لیتر است .

۴-۲. طیف سنجی گاما

نمونه ها از طریق تبخیر تا ۰/۴۵ لیتر و در بعضی مواقع که غلظتهای پایستتری انتظار میرود حجم تا ۵۰ میلی لیتر تبخیر میشود. اورانیل نترات از شرکت مـرک انحلال یافته و بعنوان محلول استاندارد در تعیین مقدار غلظت ایزوتوپی اورانیوم مورد استفاده قرار میگردد. معمولاً یک کریستال زرمانیم با خلوص بالا (HpGe، با راندمان نسبی ۴۱٪) دارای پنجره بریلیمی همراه با یک آنالیزور چند کانالی به این منظور مورد استفاده قرار میگردد. لایه محافظ از سرب ، مس و کادمیم ساخته میشود.

۵-۲. طیف سنجی آلفا

در این روش یک لیترنمونه مورد استفاده قرار میگردد. آماده سازی نمونه برطبق دستور العملی است که زمان زیادی را میطلبد و بر اساس استخراج کروماتوگرافی رزینی است و بمنظور جداسازی ایزوتوپهای اورانیوم (ASTM , D3972-90) بکار گرفته میشود. ایزوتوپ ردیاب ^{232}U به منظور تخمین راندمان جداسازی به محلول اضافه شده است. پارامترهای اصلی روشهای مختلف در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول شماره ۱- مقایسه مقادیر متوسط پارامترهای روش‌های مختلف در اندازه‌گیری‌های اورانیوم [10]

روش	فلوریمتری لیزری	فتومتری (رنگ قرمز)	شمارش درخشش مایع	طیف سنجی آلفا	طیف سنجی گاما
حجم (ml)	۰/۰۵-۰/۰۷	۱۰/۰-۰/۵	۸۰-۴۷۰	۲۰۰-۱۰۰۰	۵۰۰۰-۱۰۰۰
زمان شمارش (S)	۱۲۰	۱۸۰	۳۶۰۰-۱۰۸۰۰	۴۳۲۰۰۰-۲۱۶۰۰۰	۲۱۶۰۰۰-۸۶۴۰۰
صحت (%)	۹۰	۹۵	۹۵	۲۵	۱۴
ایزوتوپهای آنالیز شده	کل اورانیوم	کل اورانیوم	کل اورانیوم ، ^{234}U ، ^{238}U	^{238}U ، ^{234}U ، ^{235}U	^{238}U ، ^{235}U
MDA(mg/l)	۰/۰۰۰۲	۰/۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۶	۰/۱۹

حداقل غلظت قابل تشخیص - MDA

۳. بحث و بررسی

استفاده از روش نورسنجی در تعیین مقدار اورانیوم سالها بطور موفقیت آمیز انجام گرفته است. استفاده از تکنیک فلوریمتری لیزری در تعیین مقدار اورانیوم از سال ۱۹۹۹ شروع شده است. ساختار درخشنده، مقدار عامل استخراج کننده، نسبت نمونه به درخشنده، حجم نمونه و پایداری راندمان استخراج در روش شمارش درخشش مایع موثر هستند. مقایسه نتایج حاصل از روش نورسنجی و LSC بر روی نمونه های یکسان در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول شماره ۲- غلظتهای اورانیوم در نمونه های مختلف آب در اندازه گیریهای روتین [10]

شماره ردیف	بتای کل (Bq/l)	فلوریمتری لیزری اورانیوم (mg/l)	نورسنجی اورانیوم (mg/l)	LSC اورانیوم (mg/l)
۱	۶/۵۴		۰/۷۷	۰/۷۱۷۸
۲	۰/۱۳۵	۰/۰۰۷۳		۰/۰۰۷۵
۳	۰/۰۹	۰/۰۰۵۳		۰/۰۰۵۶
۴	۳/۴۴		۰/۳۶	۰/۳۷۲۹
۵	۰/۷		۰/۱۱۲	۰/۱۲۹۲
۶	۰/۰۸۵		۰/۰۱۵	۰/۰۱۵۳
۷	۰/۰۷۵	۰/۰۰۸۹		۰/۰۰۹۱
۸	۱/۱۲		۰/۱۴۴	۰/۱۹۵۸
۹	۰/۱		۰/۰۱۸	۰/۰۱۸۶
۱۰	۰/۰۷	۰/۰۰۴۶		۰/۰۰۵۳
۱۱	۰/۰۸	۰/۰۰۲۰		۰/۰۰۲۱
۱۲	۱۳/۱۵۵		۳/۳	۳/۵۰۹۶
۱۳	۷۳/۱۵۵		۸/۷۵	۷/۳۵۷۴
۱۴	۱۳/۶۹		۲/۴۳۳	۲/۱۴۱۸
۱۵	۳/۳۲۵		۰/۵۶۷	۰/۶۰۸۸
۱۶	۱/۳۸		۰/۲۱۲	۰/۱۸۸۸
۱۷	۰/۱۰۵	۰/۰۰۳۸	<۰/۰۱۰	۰/۰۰۴۲
۱۸	۰/۲۴۵		۰/۰۳	۰/۰۲۹۸
۱۹	۰/۰۴۰	۰/۰۰۰۴		۰/۰۰۰۴
۲۰	۰/۰۵۸	۰/۰۰۰۳		<۰/۰۰۰۵
۲۱	۰/۰۶۸	۰/۰۰۰۷		۰/۰۰۷۲

نتایج آنالیز ده در صد نمونه ها بصورت اتفاقی با تکرار آزمایش تایید شده اند. در صورتیکه احتمال مزاحمت وجود داشته با رقیق سازی نمونه اولیه آزمایش تکرار شده است. بمنظور اجرای روش از دیدگاه تضمین کیفیت نتایج آنالیز بعضی از نمونه ها با نتایج آزمایشگاههای دیگر مقایسه شده اند. به منظور بررسی مقایسه نتایج سه روش، از نمونه های استاندارد با کدهای IAEA-312، IAEA-313 و S-7 نمونه برداری شده و به سه روش نورسنجی، فلوریمتری لیزری و LSC آنالیز شده اند و بررسی مقایسه ای از نتایج آنها در جدول شماره ۳ آورده شده است.

جدول شماره ۳- مقایسه نتایج غلظت اورانیوم به سه روش نورسنجی، فلوریمتری لیزری و LSC [10]

کد نمونه	مقدار اورانیوم در نمونه مرجع (mg/l)	فلوریمتری لیزری (mg/l)	نورسنجی (mg/l)	LSC اورانیوم (mg/l)
IAEA-312	۱۶/۷	۱۶/۹	۱۶/۸	۱۷/۰
IAEA-313	۱۸/۲	۱۷/۷	۱۸/۹	۱۷/۶
S-7	۲/۶	۲/۵	۳/۰	۲/۶

تخمین ایزوتوپهای مختلف اورانیوم و نسبتهای آنها در نمونه های آب توسط LSC، طیف سنجی گاما و آلفا امکانپذیر است. جدول شماره ۴ بررسی مقایسه نتایج حاصل از سه روش طیف سنجی بر روی نمونه مرجع IAEA را نشان میدهد.

جدول شماره ۴- بررسی نتایج بدست آمده از روشهای طیف سنجی برای نمونه های IAEA [10]

نمونه	^{238}U (Bq/Kg)	^{235}U (Bq/Kg)	^{234}U (Bq/Kg)
IAEA-300 (مقدار مرجع)	۶۱ - ۶۸/۷	۲/۷۵	۶۴ - ۷۴
LSC	۶۳/۲		۶۶/۷
طیف سنجی آلفا	۶۵/۸	۲/۱۵	۷۰/۱
طیف سنجی گاما	۶۵/۱	۲/۵۸	

از لحاظ کمی روشهای شمارش بر اساس صحت و حداقل فعالیت قابل آشکار (MDA) با همدیگر مقایسه میشوند. نورسنجی دارای قابلیت کافی برای تخمین میزان اورانیوم است. بخاطر عملیات شیمیائی روش نورسنجی که زمان زیادی را میطلبد، روش مذکور فقط برای آبهای سطحی طبیعی بکار گرفته میشود. همانطور که از اطلاعات جدول شماره ۲ مشخص است، در محدوده غلظت ۱-۰/۰۱ mg/l اورانیوم، نتایج بدست آمده از روش LSC و نورسنجی کلاسیک تفاوتی کمتر از ۸٪ با همدیگر دارند. برای غلظتهای بالاتر، این تفاوت در اثر کاهش قابلیت استخراج HDEHP بیشتر مشاهده میشود. شمارش درخشش مایع یک روش اندازه گیری مابین نورسنجی و فلوریمتری لیزری است. این روش محدوده غلظتی ۱۰ mg/l - ۰/۰۰۰۵ را پوشش میدهد. نورسنجی لیزری فقط جوابگوی اندازه گیریهای غلظتهای نسبتاً پایین (زیر ۰/۰۰۰۲ mg/l) با همان

صحت LSC میباشد. با توجه به اطلاعات جدول شماره ۳ میتوان نتیجه گیری کرد که هر سه روش مورد بحث از دقت خوبی برخوردار بوده و کاربرد این روشها بستگی به هدف اندازه گیری، فاکتور زمانی و نوع نمونه دارد. پارامتر مهم زمان آماده سازی نمونه، زمان شمارش و رسیدن به MDA مورد نظر است. در نورسنجی احتمال آماده سازی بیش از ده نمونه بطور همزمان وجود دارد. در روش نورسنجی نیاز به نمونه با حجم زیاد نبوده و زمان نسبتاً کمی برای تجزیه اورانیوم لازم دارد. زمان لازم برای تجزیه ده نمونه حدود نیم ساعت است. روش فلوریمتری لیزری دارای سرعت تجزیه بالایی بوده و نیاز به آماده سازی خاصی ندارد. حجم نمونه مورد نیاز در این روش از کسری از میلی لیتر تا ۶ میلی لیتر است. LSC روشی سریع و نسبتاً ساده بوده و در مقایسه با طیف سنجی آلفا ی پرزحمت و طیف سنجی گامای زمان بر (در صورتیکه نیاز به تجزیه ایزوتوپی خاصی نباشد) دارای مزایای زیادی است. اضافه بر آن روش LSC، روشی منحصر بفرد برای اندازه گیری همزمان آلفا و بتا بوده و این امتیاز در آنالیز آب از اهمیت بسزائی برخوردار است.

تعیین مقدار ایزوتوپی اورانیوم توسط روش طیف سنجی گاما یا LSC انجام میگردد. این روش نیاز به آماده سازی شیمیائی مقدماتی داشته و اندازه گیری به این روش زمان بر است. طیف سنجی گاما برای نمونه های با میزان اورانیوم بالا کاربرد رضایتبخشی داشته است. طیف سنجی آلفا تعیین مقدار تمام رادیوایزوتوپهای اورانیوم را با دقت خوب امکانپذیر می نماید. امتیاز دیگر طیف سنجی آلفا قدرت جداسازی انرژی بالا (۳۰-۱۵ کیلو ولت) و سیگنال زمینه خیلی کم است. در جداول شماره ۴ و ۵ بررسی نتایج مقایسه ای سه روش طیف سنجی آورده شده است. بستگی به زمان آماده سازی، آماده سازی شیمیائی، کارهای آزمایشگاهی و هزینه ها، انتخاب یکی از روشها انجام می پذیرد. در جدول شماره ۶ نتایج آنالیز اورانیوم در نمونه های مختلف آب بررسی شده است.

جدول شماره ۵ - بررسی و مقایسه تخمین ایزوتوپی توسط سه روش طیف سنجی [10]

$^{234}\text{U}(\text{Bq/l})$	$^{235}\text{U}(\text{Bq/l})$	$^{238}\text{U}(\text{Bq/l})$	فعالیت نمونه	روش
$1/0.60 \pm 0.191$		0.827 ± 0.65	نمونه A	LSC
$1/0.40 \pm 0.105$		$1/2.01 \pm 0.84$	نمونه B	LSC
$2/0.30 \pm 0.152$		$1/9.05 \pm 0.67$	نمونه C	LSC
	$<0/110$	$1/0.5 \pm 0.147$	نمونه A	گاما
	0.60 ± 0.09	$1/2.0 \pm 0.73$	نمونه B	گاما
	$<0/090$	$1/9.0 \pm 0.52$	نمونه C	گاما
$1/194 \pm 0.131$	0.103 ± 0.33	$1/0.30 \pm 0.236$	نمونه A	آلفا
$1/0.56 \pm 0.96$	0.108 ± 0.30	$1/232 \pm 0.209$	نمونه B	آلفا
$2/115 \pm 0.186$	0.091 ± 0.08	$2/156 \pm 0.302$	نمونه C	آلفا

جدول شماره ۶ - بررسی و مقایسه غلظت اورانیوم در نمونه های مختلف آب [10]

نوع نمونه	فلوریمتری لیزری	نورسنجی	درخشش مایع	طیف سنجی گاما
آب دریا	0.0009 ± 0.0034	< 0.2	0.0009 ± 0.0036	< 0.19
آب معدنی حاوی Ca, Fe	0.0070 ± 0.02391	0.11 ± 0.243	0.0096 ± 0.02356	< 0.24
آب طبیعی	0.0003 ± 0.0007	< 0.10	0.0004 ± 0.0007	< 0.19
آب از مناطق حاوی معدن اورانیوم	-	0.43 ± 0.797	0.056 ± 0.830	0.096 ± 0.800

روش نورسنجی عملاً برای غلظتهای بیش از 10 mg/l اورانیوم و همچنین نمونه های اسیدی بکار میرود و این نمونه ها شامل آبهای دریا و آبهای مناطق دارای معادن اورانیوم میباشد. برای آنالیز اورانیوم در آبهای طبیعی، فتومتری لیزری بهترین انتخاب است. در صورتیکه فقط تخمینی از میزان اورانیوم مدنظر باشد، طیف سنجی گاما مناسب است. طیف سنجی گاما همچنین میتواند در برنامه های مقایسه ای تضمین کیفیت آنالیز اورانیوم مابین آزمایشگاههای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. هرکدام از این روشهای توصیف شده دارای معایبی هستند که در تصمیم گیری کاربرد آنها مهم میباشد. از معایب نورسنجی میتوان به زائل شدن رنگ ایجاد شده ومزاحمت محتوی فلزات سنگین محلول و همچنین صرفاً قابلیت تخمین کل مقدار اورانیوم اشاره نمود.

باروش فلوریمتری لیزری امکان اندازه گیری اورانیوم در آب حاوی کدورت نیست. ذرات ریز حل شده در آب باعث کاهش شفافیت نوری شده و اسیدی کردن نمونه باعث جلوگیری از کار فلوران میشود. اضافه برآن غلظتهای بالاتر اورانیوم در نمونه های آب نیاز به رقیق سازی بیشتری دارند. در صورتیکه غلظت اورانیوم زیاد باشد، نمونه قبل از آنالیز توسط روش LSC، رقیق میشود. مشابه مشکلاتی که با نمونه های رنگی در نورسنجی پیش می آید، بسیاری از عناصر شبیه کلسیم، منیزیم، منگنز، آهن وغیره در LSC بعنوان عامل فرونشانی (quenching) عمل می نمایند. عملاً توسط LSC فقط ایزوتوپهای ^{234}U و ^{235}U قابل تخمین هستند. مشکل بزرگ در این روش قدرت جداسازی انرژی ضعیف است. در این روش حدود تشخیص پائین بوده ونزدیک به نورسنجی لیزری است. عیب دیگر این روش مواد باقیمانده آلی است که بعد از آنالیز باقی میماند.

در مقایسه نورسنجی و فلوریمتری لیزری، LSC در نمونه های کم رنگ و همچنین نمونه هائی با غلظت بالای باقیمانده مواد خشک مورد استفاده قرار میگیرد. در چنین حالتی پس از تخریب نمونه با اسیدی کردن محلول، از فیلتراسیون یا اعمال شیمیائی دیگر استفاده میشود. بنابراین باقیمانده به نمونه اضافه میشود. در حالیکه نمونه ها با غلظت اورانیوم بیش از 2 mg/l باشد، رقیق سازی توسط آب دیونیزه توصیه میشود و معرف HDEHP فقط قادر به کمپلکس کردن تعداد محدودی از یونهای اورانیوم است. بازیابی شیمیائی از طریق طیف سنجی آلفا و روش ردیابی اندازه گیری میشود. معمولاً از دستورالعمل spike با محلول 0.05 mg/l اورانیوم

نیترات استفاده میشود. بطور معمول در اندازه گیریهای LSC هیچ آماده سازی خاصی نیاز نبوده و نتایج آن دقیق و پایدار است. معایب طیف سنجی آلفا عبارتند از: خوب نبودن راندمان شمارش، آماده سازی نمونه با یک سری از مراحل شامل کروماتوگرافی تبادل یونی (رزین ۸ X ۱ داوکس، رزینهای ایکروم) و نشان دادن لایه نازک آن بمنظور کاهش مشکلات جذب خودی. همچنین افزایش ردیاب بمنظور اندازه گیری بازیابی شیمیائی ضروری است.

۴. نتیجه گیری

این مقاله گزارشی از بررسی و مقایسه بین پنج روش مختلف (نورسنجی، فلوریمتری لیزری، LSC، طیف سنجی آلفا و گاما) جهت اندازه گیری اورانیوم در نمونه های آب است. امتیاز نورسنجی لیزری بروشهای دیگر دقت اندازه گیری بالای آن با قابلیت آشکارسازی نسبتاً پایین تر از 0.0002 mg/l است. نورسنجی لیزری دارای صحت قابل مقایسه ای با LSC بوده و دارای امتیازاتی از قبیل سرعت و اجتناب از بوجود آمدن پسمانهای آلی (همانند LSC) است. اضافه بر آن در نورسنجی لیزری نیازی به آماده سازی نمونه ویژه ای نیست. برای غلظتهای نسبتاً پایین، LSC و نورسنجی لیزری هر دو بطور یکسان قابل کاربرد بوده و نتایج آنها تفاوت قابل ملاحظه ای با همدیگر ندارند. استفاده از فلوریمتری لیزری برای آبهای آشامیدنی و معدنی بعنوان سریعترین و آسانترین روشها ترجیح داده میشود.

برای تعیین مقادیر غلظتهای بیشتر اورانیوم روش نورسنجی کلاسیک مناسب میباشد. این روش بعنوان مکمل نورسنجی لیزری بوده و مشکلات نمونه های حاوی اورانیوم زیاد و اسیدی را رفع مینماید. روش نورسنجی کلاسیک برای نمونه های اطراف مناطق دارای معادن اورانیوم مناسب میباشد. اندازه گیری اورانیوم آبهای معدنی با LSC بطور رضایتبخشی انجام میگردد. در مقایسه با روشهای رادیومتری کلاسیک، امتیازات LSC عبارتند از:

• ثبت و شمارش آلفا تقریباً بمیزان ۱۰۰٪

• آماده سازی ساده و سریع نمونه

• سیگنال زمینه خیلی کم و اندازه گیری همزمان پرتوهای آلفا و بتا

LSC یک روش اندازه گیری حد واسط مابین تعیین مقدار کل اورانیوم توسط روشهای نورسنجی و قابلیتهای طیف سنجی شمارنده های آلفا و گاما است. اندازه گیری دقیق غلظت ایزوتوپی اورانیوم در آب فقط با استفاده از روشهای طیف سنجی آلفا امکانپذیر است.



1. ASTM Designation : D3972-90
2. Balbou , 2001. Main principles and Norms for radioprotection in Republic of Bulgaria , edition 2000.
3. BG Government et al, 1989. Standards-presentation of Environment. Quality of water. Determination of uranium in water , Bulgarian national standard , 1983.
4. Directive 98/93/CE of council of 3.11.1998. official J. EU L-330,32-55.
5. Environmental protection Agency ,1997. National Primary Drinking Water Regulations ; Analytical Methodes for Radionuclides. DOE , USA,(40 CFR part 141).
6. Martinez-Aguire, A., Garcia – Leon , M.,1994. Natural radioactivity in the Guadalquivir river at the south of Spain. J. Radioanal. Nucl. Chem. 178.
7. CcDowell, W., Coleman, C. F. ,1974. Combined solvent extraction –liquid scintilation method for radioassay of alpha emitters . In: proceeding of international solvent extraction conference, 1974.
8. Richter, S., Alonso, A., 1999. The isotopic composition of commercially and available uranium chemical reagent. J. Anal. Atomic Spectrom.
9. User guide of UA-3 and analytical procedures for UA-3 uranium analysis , Scintrex Ltd., 1985.
10. Z. Tosheva, K. Stoyanovan , L. Nikolehev "Uranium determination in water" Journal of Environmental Radioactivity 72 (2004) 47-55.