

ساخت ابزارهای گیراندازی اتم، تولید کننده بخار سرد اتمی و تولید کننده هیدرید در اسپکترومتر جذب اتمی شعله‌ای و اندازه گیری کادمیم، جیوه و آرسنیک با حساسیت بالاتر

ابوالفضل ولدخانی، کاظم کارگشا*⁺، محمد حسن امینی

تهران، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، پژوهشکده محیط زیست و فناوری‌های پاک

چکیده: حضور عناصر سمی مثل کادمیم، جیوه و آرسنیک در منابع مصرفی محیطی (مانند آب آشامیدنی) در مقادیر میکروگرم در لیتر اثرات بسیار نامطلوبی بر روی سلامتی انسان بر جای می‌گذارد و کنترل مقادیر در چنین غلظت‌هایی نیازمند تکنیک‌های اندازه‌گیری است که حساسیت مورد نظر را تامین کند. تکنیک‌های اسپکترومتری جذب اتمی به دلیل کارایی بالا، سادگی و هزینه کم گزینه مناسبی برای این امر هستند با این حال حساسیت مورد نظر با روش‌های معمولی این تکنیک تامین نخواهد شد. از این رو، پژوهشگران تلاش کرده‌اند که با ساخت ابزارهایی مثل گیراندازنده اتم، تولید کننده بخار سرد، و تولید کننده هیدرید عناصر مختلفی مانند کادمیم، جیوه و آرسنیک را با حساسیت بهتری توسط اسپکترومتر جذب اتمی شعله‌ای و این ابزارها اندازه‌گیری می‌کنند. در پژوهش ارائه شده، با کپی سازی این ابزارها و متصل نمودن آنها به دستگاه معمولی اسپکترومتر جذب اتمی شعله‌ای این سه عنصر با حساسیت بسیار بهتری اندازه‌گیری شدند. در ابتدا ابزار گیراندازی اتم با استفاده از لوله کوارتز شکاف دار ساخته شده است و این وسیله برای اندازه‌گیری ۳ عنصر مذکور در محلول‌های آبی به کار گرفته شده و میزان بهبود حد آشکارسازی با فاکتوری بین ۲ تا ۳ برای آنها حاصل شده است. در مرحله بعد، ابزار تولید کننده بخار سرد برای اندازه‌گیری جیوه مشابه سازی شد. از این وسیله برای اندازه‌گیری جیوه در نمونه‌های آبی استفاده شد. حد تشخیص به دست آمده برای جیوه ۱۰۰ نانوگرم در لیتر با میانگین انحراف استاندارد نسبی ۵ درصد بود که نسبت به روش گیراندازی اتم تا ۱۰۰۰ برابر بهبود در حد تشخیص مشاهده گردید. در آخرین مرحله وسیله تولید کننده هیدرید برای اندازه‌گیری آرسنیک مشابه سازی شد. از آنجا که آرسنیک مانند جیوه توانایی تشکیل بخار اتمی سرد را ندارد، از تکنیک تولید هیدرید برای اندازه‌گیری آن استفاده شد. وسیله تولید بخار سرد بکار رفته در قسمت قبلی با اندکی تغییرات به ابزار تولید کننده هیدرید تبدیل شد و پس از این تغییر از آن برای اندازه‌گیری آرسنیک در محلول‌های آبی استفاده شد. با این روش حد تشخیص ۱ میکروگرم در لیتر برای آرسنیک به دست آمد که نسبت به روش گیراندازی اتم تا ۲۰۰ برابر بهبود نشان داد. وسایل و ابزار ساخته شده به راحتی بر روی انواع اسپکترومترهای جذب اتمی شعله‌ای قابل سوار شدن بوده و تکنیک‌های روتینی برای اندازه‌گیری این عناصر در نمونه‌های محیطی فراهم می‌آورند و می‌توان مزایایی مثل ساده بودن روش و کم هزینه تر بودن نسبت به سایر روش‌های مشابه را برای آن‌ها ذکر کرد. تعداد نمونه‌های قابل آنالیز در یک ساعت برای ۳ تکنیک گیراندازی اتم، تولید بخار سرد و تولید هیدرید به ترتیب ۱۰۰، ۲۰ و ۳۰ می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تولید بخار هیدرید، گیرانداختن اتم، کادمیم، جیوه، آرسنیک.

KEY WORDS: Vapor generation, Atom trapping, Cadmium, Mercury, Arsenic.

+E-mail: k_kargosha@ccerci.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

مقدمه

اسپکترومتری جذب اتمی شعله‌ای از قدیمی‌ترین و شناخته شده‌ترین فناوری‌های اندازه‌گیری عنصرها است. برتری این روش نسبت به سایر فناوری‌های جذب اتمی و حتی فناوری‌های نشری کم‌تر بودن هزینه نصب دستگاه و هزینه تجزیه هر عنصر است. با این حال حساسیت اندازه‌گیری عناصر در ناحیه میلی‌گرم در لیتر محدود شده است که در بسیاری از کاربردها ناحیه مطلوبی نیست و نیاز به تشخیص و اندازه‌گیری غلظت‌های پایین‌تر مورد نیاز است.

حضور عنصرهای سمی مانند کادمیم، جیوه و آرسنیک در منابع پیرامون انسان خطرهای زیادی برای سلامتی وی به وجود می‌آورد. فلز جیوه که در صنعت کاربرد دارد می‌تواند با ورود به منابع آب آشامیدنی ریسک جدی برای سلامت انسان ایجاد کند. سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا میزان ۲ میکروگرم در لیتر را حد مجاز جیوه در آب آشامیدنی تعیین کرده است. مقدارهای ۱۰ و ۵ میکروگرم در لیتر به ترتیب برای آرسنیک و کادمیم به عنوان حد مجاز در آب آشامیدنی تعیین شده است. اندازه‌گیری چنین غلظت‌هایی نیازمند به‌کار بردن یک فناوری به اندازه کافی حساس است.

اسپکترومتر جذب اتمی شعله‌ای حساسیت کافی را برای این اندازه‌گیری‌ها ندارد. این ضعف به علت دو مشکل اساسی در این فناوری است: یکی کارایی پایین نبولایزر (حدود ۱۰٪) که باعث می‌شود بخش کمی از نمونه وارد اتم‌کننده شود و دیگری زمان کوتاه اقامت اتم‌ها در ناحیه جذب است (حدود ۰/۰۰۳ ثانیه) که باعث می‌شود در عمل غلظت حالت پایایی اتم اندازه‌گیری شود [۱].

فناوری‌های تولید بخار برای غلبه بر مشکل بازده پایین انتقال نمونه به اتم‌کننده در روش شعله‌ای معمولی، معرفی شده‌اند [۲]. در اینجا آنالیت موجود در محلول نمونه در واکنش با یک عامل کاهنده به صورت بخار ملکولی/ اتمی از ماتریس آن جدا شده و در فاز بخار به اتم‌کننده یا محل اندازه‌گیری جذب منتقل می‌شود. در این حالت بازده انتقال نمونه به تقریب ۱۰۰٪ است.

برای برطرف کردن مشکل زمان کوتاه اقامت اتم در ناحیه جذب می‌توان از فناوری‌های گیراندازی اتم استفاده کرد. در این حالت بخار اتم‌های نمونه به یک محیط بسته هدایت می‌شود و به نوعی زمان ماندن اتم‌ها در ناحیه جذب تابش افزایش می‌یابد.

بخش نظری

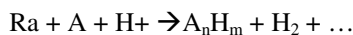
لوله کوارتز شکاف دار

لوله کوارتز شکاف دار وسیله‌ای ساده است که با استفاده از یک نگه دارنده بر روی اتم ساز دستگاه جذب اتمی قرار می‌گیرد و باعث می‌شود که اتم‌های تولید شده در شعله، مدت زمان بیشتری در ناحیه جذب قرار بگیرند. افزون بر این نفوذ جزئی هوا به داخل شعله کاهش می‌یابد و شعله محیط کاهنده‌تری به خود می‌گیرد که به نوعی بازده اتم شدن را افزایش می‌دهد.

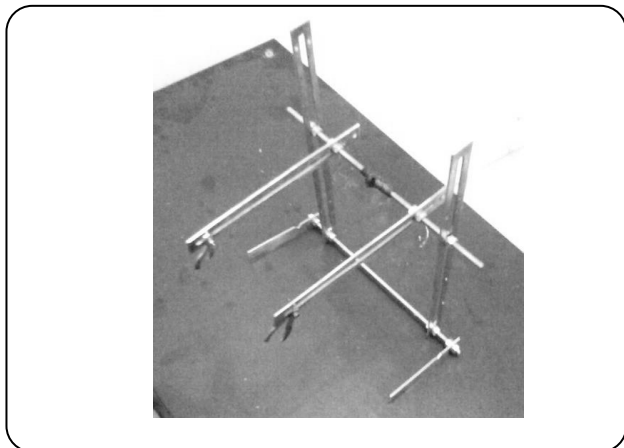
جنس لوله به طور عموم کوارتز است با این حال می‌توان از فولاد، گرافیت، آلومینا و برخی دیگر از فلزها نیز استفاده کرد. به طور معمول یک شکاف در پایین لوله برای ورود شعله و یک شکاف در بالای لوله برای خروج فرآورده‌های گازی گذاشته می‌شود. دو انتهای لوله نیز باز است تا از جمع شدن فرآورده‌های گازی شعله در داخل لوله جلوگیری شود. با استفاده از این لوله می‌توان حد آشکار سازی را در اندازه‌گیری بیشتر عنصرهای ۲ تا ۵ بار افزایش داد [۱،۳].

تولید بخار

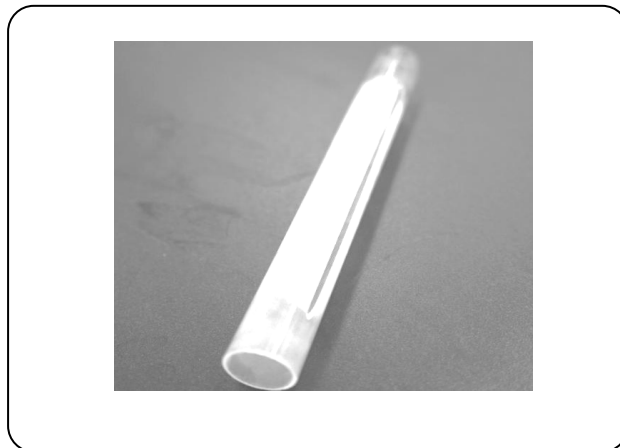
در فناوری‌های تولید بخار، محلول اسیدی شده نمونه طبق معادله زیر با یک عامل کاهنده واکنش می‌دهد:



که A آنالیت مورد تجزیه و Ra عامل کاهنده است. در بین فناوری‌های تولید بخار، تولید بخار سرد و تولید هیدرید در زمره‌ی پر استفاده‌ترین روش‌ها هستند. روش تولید بخار سرد فقط در مورد جیوه به کار می‌رود. در این حالت محلول جیوه در واکنش با کاهنده‌ای مانند قلع کلرید بخار اتمی جیوه را به صورت مستقیم در دمای اتاق تولید می‌کند. در این صورت به شعله در دستگاه اسپکترومتر جذب اتمی برای اتم کردن جیوه نیازی نیست و می‌توان تجزیه را به طور مستقیم بر اتم‌های جیوه تولید شده در دمای اتاق انجام داد. در آنالیز جیوه با این روش می‌توان به حد تشخیص‌های تا حد چند نانو گرم در لیتر دست یافت. در روش تولید هیدرید آنالیت مورد نظر که اغلب در زمره‌ی عنصرهای فرار است در محیط اسیدی با کاهنده‌ای مانند سدیم بوروهیدرات واکنش می‌دهد و ترکیب هیدرید آنالیت مورد نظر را تولید می‌کند. گونه هیدرید به اتم‌کننده منتقل شده و با بازده بالایی اتم می‌شود. در این حالت می‌توان به حد تشخیص‌هایی در حد چند میکروگرم در لیتر و یا کمتر از میکروگرم در لیتر دست یافت.



شکل ۲- نگه دارنده لوله کوارتز.



شکل ۱- لوله کوارتز شکاف دار.

برای پایدار نگه داشتن محلول های آرسنیک، آنها در هیدروکلریک اسید ۱ مولار ساخته می شدند. محلول قلع کلرید ۱۰٪ از حل کردن مقدار متناسب پودر سفید $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ در هیدروکلریک اسید ۱٪ به دست می آمد. محلول سدیم بوروهیدرات ۵٪ از انحلال قرص NaBH_4 در سود ۵٪ به دست می آمد. محلول های استاندارد پایه هر ۲ ماه یک بار تهیه می شدند و محلول های استاندارد به صورت روزانه از محلول های استاندارد پایه تهیه می شدند. همه محلول ها زمانی که مورد استفاده نبودند در دمای ۴ درجه نگه داری می شدند.

دستگاه ها

دستگاه جذب اتمی شعله ای Varian A220 در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. برای فناوری گیراندازی اتم یک نگه دارنده و یک لوله کوارتز ساخته شد. نگهدارنده از جنس فولاد ضد زنگ بوده و قابلیت سوار شدن روی انواع اسپکترومتر جذب اتمی را دارد. به کمک این نگهدارنده می توان محل استقرار لوله کوارتز را در دو جهت بالا - پایین و عقب - جلو تنظیم نمود. لوله کوارتز با طول ۱۵۰ و قطر داخلی ۱۵ میلی متر ساخته شد. طول شکاف پایین لوله ۱۰۰ و شکاف بالا ۸۰ میلی متر بود. شمای کلی نگه دارنده و لوله کوارتز در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

برای تولید بخار سرد یک سامانه تولید کننده بخار سرد مطابق شکل ۳ به طور کامل ساخته شد.

در این وسیله، نمونه، اسید و کاهنده به داخل ظرف واکنش

این فناوری را می توان در مورد آرسنیک، بیسموت، قلع، آنتیموان، تلریم، سلنیم و کادمیم به کار برد [۲].

بخش تجربی

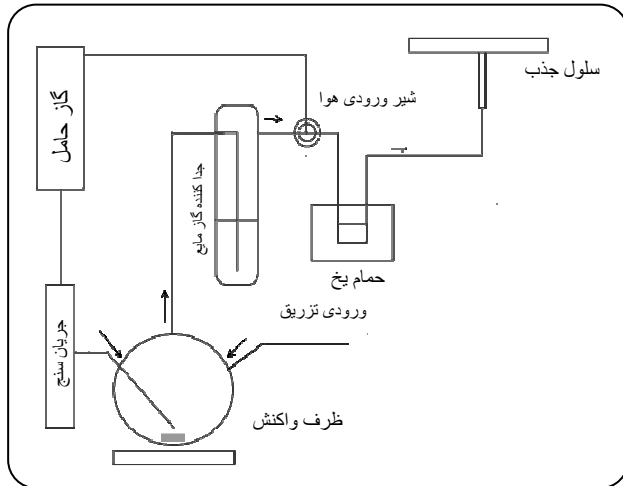
محلول ها

آب مقطری که در آزمایش ها استفاده شده از دستگاه خالص سازی آب میلی - کیو^(۱) که آبی با هدایت ۱۸ مگا اهم تولید می کند تهیه شد. همه مواد جامد مورد استفاده با درجه تجزیه ای^(۲) (با حداقل خلوص ۹۹٫۸ درصد) بودند. محلول های اسید مورد استفاده از محلول های غلیظ پایه با درجه تجزیه ای بودند.

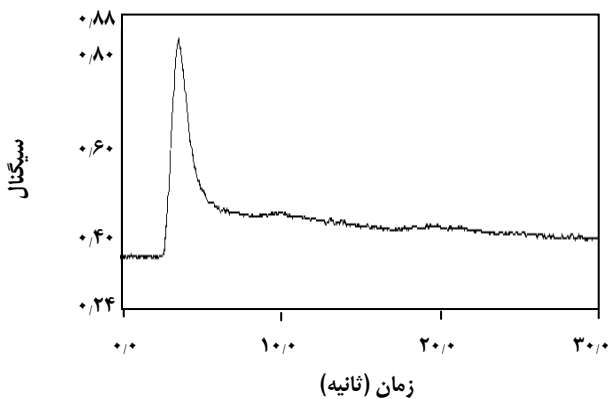
برای تهیه محلول استاندارد مادر جیوه (۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر)، مقدار مشخصی از نمک HgCl_2 در کمترین مقدار نیتریک اسید در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد تا زمانی که محلول به طور کامل شفافی به دست آید، حل شد. سپس این محلول به وسیله آب مقطر به حجم رسانده شد برای تهیه محلول استاندارد پایه (۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر) کادمیم مقدار مشخص از نمک $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3\text{H}_2\text{O}$ در کمترین مقدار نیتریک اسید حل شده و سپس با آب مقطر به حجم رسانده شد. محلول استاندارد مادر آرسنیک از حل کردن نمک As_2O_3 در هیدروکلریک اسید و به حجم رساندن با آب مقطر به دست آمد. در مورد محلول های جیوه و آرسنیک زمانی که غلظت های کمتر از میلی گرم در لیتر مورد بررسی قرار می گرفتند باید ماده ای را برای پایدار نگاه داشتن آنالیت به محلول اضافه کرد. در مورد جیوه به محلول ها ۵٪ (حجمی) نیتریک اسید و ۵٪ هیدروکلریک اسید افزوده شدند.

(۱) Milli-Q

(۲) Analytical grade



شکل ۳- طرح کلی تولید کننده بخار اتمی.



شکل ۴- پیک جذب اتمی دستگاه اسپکترومتر جذب اتمی - بخار سرد.

حد آشکارسازی همانندی برای تعداد زیادتری از عنصرها هم امکان پذیر است. برای آن دسته از عنصرها که بهبود حد آشکارسازی دیده نمی شود به طور قطع اندازه گیری با دقت بهتری می تواند انجام شود.

با این که قرار دادن یک لوله کوارتز شکاف دار می تواند باعث بهبود حد آشکارسازی در روش جذب اتمی شعله ای شود ولی مهم ترین اشکال روش عمر کوتاه لوله کوارتز است. به طور متوسط با هر لوله می توان ۲۰۰ تجزیه را انجام داد. پوشاندن سطح لوله با لاتانیم می تواند عمر لوله را ۲ تا ۳ برابر افزایش دهد.

سامانه تولید بخار

برای اندازه گیری جیوه، ۱ میلی لیتر از محلول نمونه مورد تجزیه به همراه ۱ میلی لیتر از محلول کاهنده و ۴ میلی لیتر از محلول اسید

(راکتور، یک بالن شیشه ای سه دهانه ۲۵ میلی لیتری) وارد شده و واکنش آن ها برای مدت زمان مشخصی ادامه می یابد. سپس جریان گاز حامل بخارهای تولید شده که شامل بخار اتمی جیوه است را منتقل می کند. در بخش جدا کننده گاز - مایع، بخشی از مزاحمت ها که در فاز گازی وجود دارند از جریان گاز جدا شده و در بخش حمام یخ بخارهای آب موجود در جریان گازی به صورت مایع درآمده و از جریان گاز جدا می شوند. سرانجام بخار وارد سلول اندازه گیری شده و میزان جذب بخار اتمی جیوه اندازه گیری می شود. تمامی قطعه های وسیله به طور جداگانه ساخته شده اند و همگی چنان بهینه شده اند که سیگنال خروجی دستگاه پیک باریک و بلندی را با کمترین نوفه ایجاد کند. مواردی که بهینه شدند شامل: حجم راکتور، حجم مایع داخل جداکننده گاز مایع، حجم حمام یخ، دمای حمام یخ، نوع سلول اندازه گیری، سرعت جریان گاز حامل، مقدار اسید و مقدار کاهنده لازم برای واکنش و زمان واکنش. نمونه پیک جذب اتمی ثبت شده در شکل ۴ دیده می شود.

برای تولید هیدرور، تغییرهایی در سامانه تولید کننده بخار سرد (شکل ۳) داده شد. حمام یخ حذف شد زیرا بخار آب در اینجا مزاحمت چشمگیری را ایجاد نمی کند. از شعله استیلن - هوا به عنوان اتم کننده استفاده شد. همچنین نوع سلول اندازه گیری از لوله T شکل ساده در قسمت قبل به سلول T شکل شکاف دار (فقط یک شکاف در پایین برای ورود شعله) تغییر یافت. افزون بر این در سامانه تولید کننده بخار سرد از قلع کلرید به عنوان کاهنده استفاده می شد ولی در سامانه تولید هیدرور از سدیم بوروهیدرات استفاده شد. قلع کلرید به صورت اختصاصی تنها با جیوه واکنش می دهد.

نتیجه ها و بحث

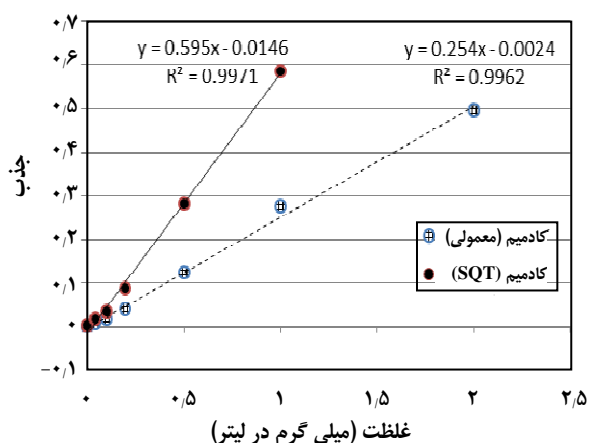
سامانه لوله کوارتز شکاف دار

در این پژوهش از لوله کوارتز شکاف دار ساخته شده برای اندازه گیری جیوه، آرسنیک و کادمیم استفاده شده (این لوله کوارتز شکاف دار بالای شعله استیلن - هوا قرار داده شده است). منحنی های کالیبراسیون در شکل های ۵ و ۶ و نتیجه ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

با توجه به نتیجه های داده شده در جدول ۱، دیده می شود که در اندازه گیری کادمیم، جیوه و آرسنیک حد آشکارسازی در روش لوله کوارتز شکاف دار در مقایسه روش شعله ای معمولی ۴ تا ۱۰ برابر بهبود یابد. بررسی های اولیه نشان دادند که بهبود

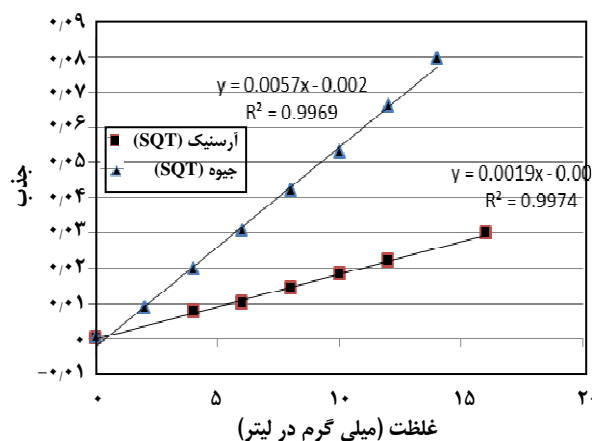
جدول ۱- ارقام شایستگی روش جذب اتمی-لوله کوارتز شکاف دار در اندازه گیری جیوه، آرسنیک و کادمیم.

کادمیم با شعله معمولی	کادمیم با لوله کوارتز شکاف دار	
-	۲,۰۸	بهبود حساسیت
۳,۹	۲,۳	%RSD
۰,۰۲	۰,۰۰۵	حد تشخیص (میلی گرم در لیتر)
جیوه با شعله	جیوه با لوله کوارتز شکاف دار	
-	۲,۸	بهبود حساسیت
۳,۵	۲,۶	%RSD
۲,۳	۰,۶۳	حد تشخیص (میلی گرم در لیتر)
آرسنیک با شعله	آرسنیک با لوله کوارتز شکاف دار	
-	۳,۲	بهبود حساسیت
۹	۴,۵	%RSD
۲	۰,۲	حد تشخیص (میلی گرم در لیتر)



شکل ۶- مقایسه منحنی‌های کالیبراسیون کادمیم توسط شعله معمولی و به همراه لوله SQT.

برای ارزیابی این روش مقادیر مشخصی از محلول استاندارد به نمونه‌های آب معدنی افزوده شده و میزان بازیابی ۱۰۵٪ و ۱۰۸٪ برای مقادیر تزریق ۲۰ و ۱۰ میکروگرم در لیتر جیوه به دست آمد. بیشتر مزاحمت‌های این روش به علت حضور بخار آب و سایر مایع‌ها در محیط است که باعث تجمع بر روی سطوح به ویژه سلول اندازه‌گیری می‌شوند. بخش بیشتر این مایع‌ها در حمام یخ جدا می‌شود. با این حال در صورت دیده شدن این مایع‌ها می‌بایست سلول اندازه‌گیری به خوبی تمیز شود. وجود سایر مزاحمت‌های شیمیایی را می‌توان با روش افزایش استاندارد بررسی کرد.

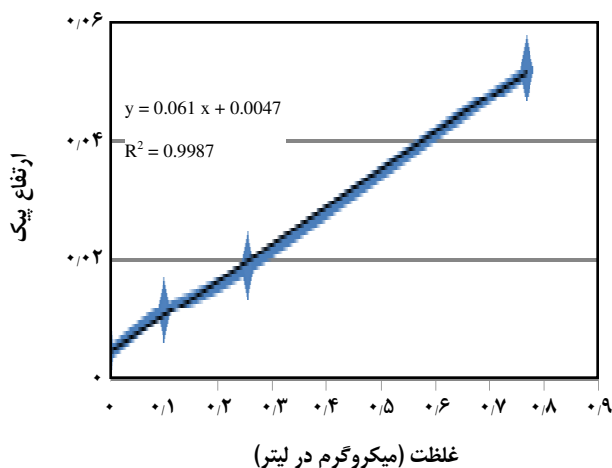


شکل ۵- منحنی‌های کالیبراسیون جیوه و آرسنیک با استفاده از لوله SQT.

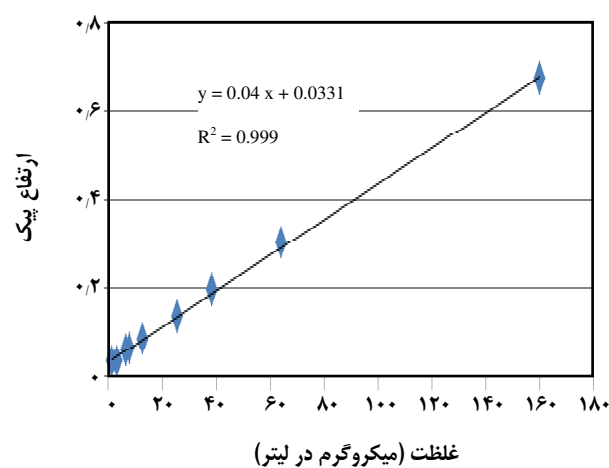
از روش سپتوم (محل تزریق) تزریق شده و پس از ۱۲۰ ثانیه که واکنش کامل شد ثبت سیگنال جذب اتمی شروع می‌شود. سلول کوارتز مورد استفاده یک لوله T شکل بوده که بر روی نگه دارنده سوار شده و در مسیر تابش نور منبع قرار می‌گیرد. بازوی دیگر نیز برای انتقال بخار آنالیت به داخل سلول استفاده می‌شود. در اینجا نیازی به شعله دستگاه نیست. ارقام شایستگی که از تزریق محلول‌های استاندارد در گستره ۰,۲ تا ۱۶۰ میکروگرم در لیتر به دست آمده در جدول ۲ و منحنی‌های کالیبراسیون در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲- ارقام شایستگی روش جذب اتمی - بخار سرد در اندازه‌گیری جیوه.

۰/۱	حد آشکار سازی (میکروگرم در لیتر)
۰/۱۷	حد کمی سازی (میکروگرم در لیتر)
۵/۱۰٪	میانگین انحراف استاندارد نسبی برای گستره غلظتی ۰/۱۷ تا ۱۶۰ میکروگرم در لیتر
۰/۹۷٪	انحراف استاندارد نسبی برای محلول ۲۵ میکروگرم در لیتر
۱۶۰ تا ۰/۸	گستره خطی ۱ (میکروگرم در لیتر)
۰/۱۷ تا ۰/۸	گستره خطی ۲ (میکروگرم در لیتر)
۰/۹۹۹	ضریب R^2 برای گستره خطی ۱
۰/۹۹۸	ضریب R^2 برای گستره خطی ۲



شکل ۸- منحنی کالیبراسیون جیوه در گستره خطی ۲.



شکل ۷- منحنی کالیبراسیون جیوه در گستره خطی ۱.

نتیجه‌گیری

اسپکترومتری جذب اتمی شعله‌ای از قدیمی‌ترین فناوری‌ها در زمینه اندازه‌گیری عنصرها است. با اینکه حساسیت در این روش در حد میلی‌گرم در لیتر است ولی همانگونه که نشان داده شد می‌توان با به کار بردن ابزار ساده‌ای این حساسیت را بهبود داد. استفاده از لوله کوارتز شکاف‌دار افزون بر بهبود حد تشخیص به میزان ۲ تا ۳ برابر، دقت اندازه‌گیری را نیز بهبود می‌بخشد. استفاده از فناوری‌های تولید بخار موجب افزایش بیش از پیش بازده رسیدن نمونه به اتم‌کننده و بهبود حساسیت اندازه‌گیری در مورد جیوه و برخی عنصرهای فرار می‌شود. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده توسط سامانه گیراندازی اتم و سامانه تولید بخار که به طور مفصل در بخش تجربی مورد بررسی قرار گرفتند می‌توان از چنین سامانه‌های ساده و کارآمدی در اسپکترومتری جذب اتمی شعله‌ای

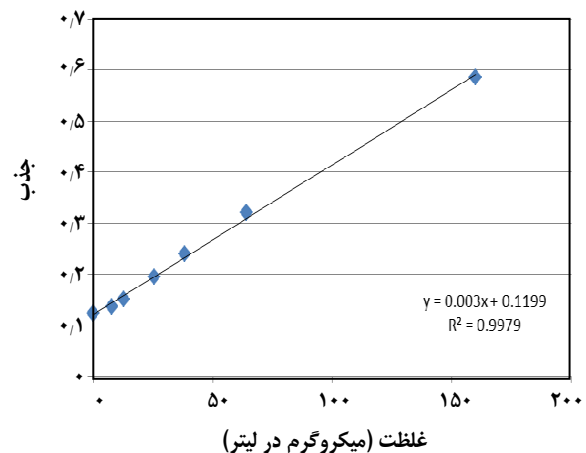
سامانه تولید کننده هیدرید

در این مرحله سامانه تولید هیدرید برای اندازه‌گیری آرسنیک مورد استفاده قرار گرفت. اتم‌کننده در اینجا یک لوله T شکل است که یک شکاف در پایین برای ورود شعله وجود دارد. این لوله توسط نگه دارنده بر روی شعله ساز قرار گرفت. جدول ۳ ارقام شایستگی برای اندازه‌گیری آرسنیک با این روش را نشان می‌دهد و منحنی کالیبراسیون در شکل ۹ نشان داده شده است. بررسی مزاحمت در اندازه‌گیری آرسنیک نشان می‌دهد که حضور نیتریک اسید به اندازه ۱٪ در محلول باعث کاهش ۵٪ سیگنال می‌شود. حضور بسیاری عنصرها تا نسبت ۱۰۰ برابر، تأثیر زیادی بر روی ارتفاع پیک ندارند با این حال حضور عنصرهایی مانند کادمیم می‌تواند شکل پیک‌ها را کمی دگرگون کند که این موضوع تأثیری بر روی ارتفاع پیک ندارد.

جدول ۳- ارقام شایستگی روش جذب اتمی شعله‌ای - تولید هیدرید در اندازه گیری آرسنیک.

۱/۱	حد تشخیص (میکرو گرم در لیتر)
۲/۶	حد کمی سازی (میکروگرم در لیتر)
۲/۶-۱۶۰	گستره خطی (میکروگرم در لیتر)
%۳۰	میانگین انحراف استاندارد نسبی
۰/۹۹۸	ضریب R^2 منحنی کالیبراسیون

استفاده نمود و حد آشکارسازی و دقت را بهبود بخشید. فناوری‌های همانندی که برای اندازه‌گیری چنین عنصرهایی به کار می‌روند یا از نظر هزینه و یا از نظر پیچیدگی با این روش قابل مقایسه نیستند. به کار بردن روش های پیش تغلیظ شیمیایی نیز دارای محدودیت‌هایی از نظر خودکار کردن روش و یا در قرار گرفتن در آلودگی‌های جانبی را دارد. درحالی که سامانه‌های تولید کننده بخار سرد و هیدرید به راحتی قابل خودکار شدن هستند. با این حال بزرگترین محدودیت این سامانه‌های نوآورانه محدود بودن کاربرد آن‌ها در اندازه‌گیری حدود پانزده عنصر می باشد.



شکل ۹- منحنی کالیبراسیون آرسنیک.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۸/۲۲

مراجع

- [1] Henryk Matusiewicz, Atom Trapping and in Situ Preconcentration Techniques for Flame Atomic Absorption Spectrometry, *Spectrochimica Acta Part B*, **52**, p. 1711 (1997).
- [2] Xiu-Ping Yan, Zhe-Ming Ni, Vapour Generation Atomic Absorption Spectrometry, *Analytica Chimica Acta*, **291**, p. 89 (1994).
- [3] Watling R.J., "The Use of a Slotted Quartz Tube for the Analysis of Trace Metals in Fresh Water", *Water SA*, **3**(4), (1977).
- [4] Farant J.-P. et al., Improved Cold-Vapor Atomic Absorption Technique for the Microdetermination of Total and Inorganic Mercury in Biological Samples, *Journal of Analytical Toxicology*, **5**(1), p. 47 (1980).
- [5] Mu-Qing Yu, Gui-Qin Liu, Determination of Trace Arsenic, Antimony, Selenium and Tellurium in Various Oxidation States in Water by Hydride Generation and Atomic-Absorption Spectrophotometry after Enrichment and Separation with Thiol Cotton, *Talanta*, **30**(4), p. 265 (1983).