



طراحی و توسعه یک حسگر الکتروشیمیایی جدید و کارا با ویژگی اندازه‌گیری نیکل در نمونه‌های آبی

فریبا تدین

گروه شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Email: F_Tadayon@iau-tnb.ac.ir

مهدیه السادات دهقانی

گروه شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Email: msdehghani64@yahoo.com

نیلوفر ترابی فرد

گروه شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Email: niloufar.torabifard@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، یک حسگر الکتروشیمیایی مبتنی بر الکتروود خمیر کربن (CP) اصلاح شده با پلیمر قالب مولکولی (MIP) برای شناسایی و اندازه‌گیری یون نیکل طراحی و ساخته شد. برای تهیه پلیمر قالب مولکولی ابتدا کمپلکس نیکل بنزوئات تهیه و سپس از ۲- هیدروکسی اتیل متاکریلات، ۲و۲- آزوبیس ایزوبوتیرونیتریل و اتیلن گلایکل دی متاکریلات استفاده شد. در ادامه، یک الکتروود خمیر کربن اصلاح شده با استفاده از پلیمرهای تهیه شده برای اندازه‌گیری یون نیکل در محلول‌های حقیقی ساخته شد. تحت شرایط بهینه به دست آمده، حد تشخیص $5/00 \times 10^{-9}$ مول بر لیتر و گستره خطی $1/0 \times 10^{-10} - 1/0 \times 10^{-1}$ مول بر لیتر با شیب نرنستی $30/66 \pm 0/4$ mV decade⁻¹ به دست آمد. الکتروود پیشنهادی زمان پاسخ سریع ۵ ثانیه دارد و می‌تواند به مدت ۱۰ هفته بدون تغییر قابل توجهی در پتانسیل مورد استفاده قرار گیرد. از این الکتروود، به طور موفقیت‌آمیزی برای اندازه‌گیری یون‌های نیکل در نمونه‌های نظیر آب چاه و پساب صنعتی با نتایج رضایت بخشی استفاده شده است.

کلیدواژه: حسگر، پلیمر قالب مولکولی، نیکل، الکتروود اصلاح شده، پساب صنعتی.

مقدمه

با توسعه صنایع و افزایش تولیدات، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها به محیط زیست وارد می‌شوند. در این میان فلزات سنگین جز آلاینده‌های مهم محسوب می‌شوند. این آلاینده‌ها حتی در مقادیر بسیار کم می‌توانند باعث به خطر انداختن سلامت افراد و نیز پدید آمدن تهدیدهای زیستی شوند [۱]. در میان این آلاینده‌ها برخی سرطان‌زا و برخی در مقادیر جزئی جزو نیازهای بدن موجودات زنده محسوب می‌شوند. به طور کلی منشاء انتشار عناصر فلزی در زیست کره به دو صورت طبیعی و یا فعالیت انسانی می‌باشد که در نتیجه آن میزان فلزات سنگین در آب، غذا و هوای تنفسی افزایش می‌یابد. نیکل یکی از فلزات سنگینی است که در فاضلاب‌های صنعتی به وفور یافت می‌شود و غلظت زیاد آن باعث سرطان ریه، استخوان و بینی می‌شود [۲]. بیش از ۴۰ درصد نیکل موجود در محیط زیست از طریق کارخانه‌های صنعتی تولید می‌شود که سهم بسزایی در آلودگی آب‌های سطحی دارد [۳]. روش‌های تجزیه‌ای متفاوتی از قبیل اسپکتروفتومتری [۴]، میکرو استخراج مایع - مایع پخشی [۵]، الکتروفورز موئینه‌ای [۶] و روش الکتروشیمیایی [۷-۹] برای تعیین نیکل در نمونه‌های زیستی گزارش شده است. در این میان، روش‌های الکتروشیمیایی به عنوان سامانه‌هایی سریع، ساده، با گزینش‌پذیری بالا، ارزان قیمت و نتیجه‌های تکرارپذیر، جایگاه خاصی را به خود اختصاص داده‌اند. از میان روش‌های الکتروشیمیایی، روش پتانسیومتری با حسگرهای خمیر کربن اصلاح شده، روشی آسان و ارزان بوده و به دلایل مهم دیگری از جمله ساخت ساده الکترودهای کار، قابلیت تجدید آسان سطح الکترودها، پاسخ نسبتاً سریع، گستره‌ی غلظتی نسبتاً وسیع و سازگاری با انواع مختلفی از اصلاح‌گرهای مختلف، کاربردهای بسیار زیادی در اندازه‌گیری انواع آلاینده‌های زیست‌محیطی اعم از گونه‌های مولکولی و یونی پیدا کرده است [۱۰]. در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای

طراحی و تهیه‌ی حسگرهای الکتروشیمیایی توسعه یافته است. مهم‌ترین عامل در ساختار حسگرهای پتانسیومتری به منظور انجام فرایند شناسایی و اندازه‌گیری گونه هدف (اعم از گونه مولکولی و یونی)، حضور یک عامل حس کننده منحصر به فرد برای آن گونه هدف مورد نظر می‌باشد که باعث گزینش‌پذیر بودن حسگر می‌گردد. در سال‌های اخیر برای بهبود عملکرد و همچنین گزینش‌پذیری حسگرهای پتانسیومتری، از پلیمرهای قالب مولکولی و یونی برای اندازه‌گیری گونه‌های مولکولی و یونی استفاده شده است [۱۱ و ۱۲]. امروزه محققین جهت طراحی الکترودهای مخصوص هر آنالیت مطالعاتی را انجام داده و موفق به ساخت الکترودهای گزینش‌پذیر تحت عنوان سنسور شده‌اند. در راستای افزایش گزینش‌پذیری سنسورها، در ساختار آن‌ها از ترکیباتی تحت عنوان اصلاح کننده استفاده می‌شود. در مطالعات جدید، استراتژی سنتز پلیمرهای قالب مولکولی جهت کاربرد آن‌ها به عنوان اصلاح کننده‌ی ساختار سنسور مورد توجه قرار گرفته است. این پلیمرها دارای پایداری شیمیایی، حرارتی و مکانیکی عالی هستند و همچنین مانند سیستم‌های بیولوژیکی توانایی تطابق با ویژگی‌های مولکول‌های مورد نظر را نیز دارند [۱۳-۱۵]. در الکترودهای مبتنی بر MIP حضور مولکول هدف درون قالب‌های موجود در ساختار پلیمر موجب ایجاد یک تغییر الکتروشیمیایی مانند تغییر در رسانایی الکتریکی، ظرفیت الکتریک، شدت جریان عبوری و ... می‌شود. این تغییرات پردازش و تبدیل به یک سیگنال الکتریکی قابل مشاهده می‌شوند. حسگرهای الکتروشیمیایی در حال حاضر بیش‌ترین کاربرد را در میان سایر حسگرهای متکی بر پلیمرهای قالب مولکولی دارند [۱۶]. از جمله کاربردهای این روش می‌توان به تغلیظ نمونه‌های جزیبی به کمک SPE و جداسازی انتخابی آنالیت فلزی اشاره نمود. این روش دارای پایداری نسبتاً زیادی می‌باشد و قابلیت تولید با کم‌ترین

و ترکیبات مورد استفاده در این پژوهش از شرکت مرک خریداری شدند.

-تهیه پلیمر قالب ملکولی

به منظور تهیه ملکول هدف، ابتدا کمپلکس یون نیکل با وینیل بنزوات تهیه شده است. بدین ترتیب، ابتدا مقدار مناسبی از وینیل بنزوئیک اسید در محلول سود ۰/۰۱ مولار و اتانول حل گردید. سپس ۰/۴۴۸ گرم سولفات نیکل را در ۲۰ میلی لیتر آب حل و به محلول فوق اضافه شده، تحت این شرایط رسوبی سبز رنگ مشاهده می گردد. مخلوط به دست آمده را خنثی نموده و تا ۶۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد. آن گاه رسوب به دست آمده صاف و با آب گرم شسته و خشک شد. مقداری از کمپلکس نیکل بنزوات تهیه شده را در ۵ میلی لیتر محلول ۲- متوکسی اتانول حل کرده و با ۲- هیدروکسی اتیل متاکریلات مخلوط شد، سپس اتیلن گلایکل دی متا کریلات ۸۰٪ مولی نسبت به کل مونومر و ۲ و ۲- آزو بیس ایزو بوتیرونیتریل به مخلوط اضافه گردید. در ادامه مخلوط پلیمرزاسیون تا دمای صفر درجه سانتی گراد سرد شد. جهت حذف اکسیژن، گاز N_2 به مدت ده دقیقه از محلول عبور داده شد. سپس درب ظرف به خوبی بسته و در حمام روغن با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۳ ساعت حرارت داده شد و حلال اضافی تبخیر گردید. قابل ذکر است که پلیمر قالب گیری نشده نیز با روش مشابه تهیه شد. با این تفاوت که در این جا از مولکول هدف استفاده نشده است. به منظور استخراج مولکول هدف از شبکه MIP، پلیمر به دست آمده با استفاده از مخلوط حلال های اتانول - اسید کلریدریک ۲ مولار و با روش سوکسله شست و شو داده شد.

-تهیه الکتروود خمیر کربن اصلاح شده

به منظور ساخت الکتروود، نسبت های مشخصی از پودر گرافیت، پارافین و پلیمرهای قالب یونی نیکل تهیه شده مخلوط و در درون یک هاون عقیق به طور کامل یکنواخت گردیدند. این مخلوط همگن در انتهای یک سرنگ انسولین پر شد. در ادامه، برای برقراری جریان

هزینه و در کوتاه ترین زمان را دارد. علاوه بر این در دما و فشار بالا پایدار می باشد [۱۷، ۱۸].

در این پژوهش، یک حسگر ولتامتری مبتنی بر الکتروود خمیر کربن اصلاح شده با MIP برای شناسایی و اندازه گیری یون نیکل در نمونه های آبی توسعه یافته است.

مواد و روش ها

- دستگاه ها

تمامی اندازه گیری های الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه Multi Parameters analyser مدل Consort c863 ساخت بلژیک انجام شد. الکترودهای مورد استفاده شامل الکتروود مرجع Ag/AgCl KCl و الکتروود خمیر کربن اصلاح شده به عنوان الکتروود کار می باشند. برای تنظیم pH محلول ها، از pH متر (مدل ۶۹۱) ساخت شرکت metrohm سوئیس استفاده شد. ریخت شناسی MIP سنتز شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) Hitachi مدل S-4160 بررسی شد. جهت شناسایی پلیمر قالب یونی، از دستگاه تبدیل فوریه ی زیرقرمز (FT-IR) مدل BM Series ($500 - 4500 \text{ cm}^{-1}$) ساخت شرکت (ماساچوست - آمریکا) استفاده گردید. همچنین از ازطیف سنجی جذب اتمی الکتروترمال (ET-AAS) از نوع Zeeman مدل AA240Z ساخت شرکت واریان در این پروژه استفاده شده است.

-مواد شیمیایی

تمام مواد شیمیایی استفاده شده، از بالاترین درجه ی خلوص تجزیه ای برخوردار بوده اند. از آب دوبار تقطیر برای تهیه محلول ها، رقیق کردن و شستشو استفاده گردید. همچنین برای سنتز پلیمر قالب مولکولی یون نیکل، ۲- هیدروکسی اتیل متا کریلات (به عنوان مونومر) از شرکت مرک، اتیلن گلایکل دی متا کریلات (به عنوان اتصال دهنده عرضی) و ۲ و ۲- آزو بیس ایزو بوتیرونیتریل (به عنوان آغازگر) از شرکت سیگما-آلدریج، وینیل بنزوئیک اسید، سولفات نیکل، ۲ متوکسی اتانول و همچنین سایر معرف ها، حلال ها

زمان پاسخ، شیب نرنستی، و طول عمر تعدادی از الکترودهای یون نیکل که در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند، با مقادیر ویژگی‌های مربوط به الکترودهای پیشنهادی در این پروژه، مقایسه شده‌اند و نتایج این مقایسه در جدول (۱) گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامترهای پتانسیومتری الکترودهای پیشنهادی، نسبت به پارامترهای پتانسیومتری الکترودهای گزارش شده قبلی، از شرایط مطلوب‌تری برخوردار است.

الکتریکی، از یک سیم مسی با ضخامت مناسب استفاده شده است، که وارد لوله‌ی سرنگ شده و با خمیر اتصال پیدا می‌کند.

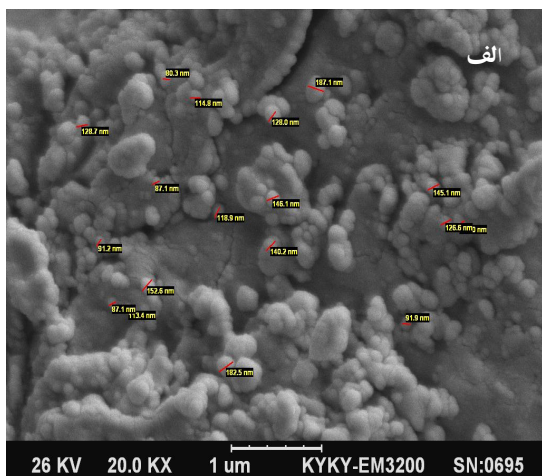
یافته‌ها و بحث

در کار تحقیقاتی مورد بحث، به معرفی یک حسگر الکتروشیمیایی خمیر کربنی جدید بر پایه یک پلیمر قالب ملکولی پرداخته شده است و از آن برای اندازه‌گیری نیکل در نمونه‌های آبی استفاده گردید. برخی از ویژگی‌های پاسخ الکترودهای طراحی شده مانند گستره خطی، حد تشخیص،

جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های پاسخ حسگرهای گزارش شده قبلی با حسگر ارائه شده در این کار تحقیقاتی برای اندازه‌گیری پتانسیومتری نیکل (جدول ۲، حسگر شماره ۵، ۶، pH).

منبع	زمان پاسخ (ثانیه)	شیب نرنستی (mV decade^{-1})	گستره خطی (مول بر لیتر)	حد تشخیص (مول بر لیتر)
الکترودهای پیشنهادی	۵	۳۰/۶۶	$1/0 \times 10^{-1} - 1/0 \times 10^{-10}$	$5/0 \times 10^{-9}$
۱۹	۱۵	۲۸	$1/0 \times 10^{-2} - 1/0 \times 10^{-7}$	$4/0 \times 10^{-8}$
۲۰	۲۰	۲۴	$1/0 \times 10^{-1} - 5/6 \times 10^{-6}$	$2/0 \times 10^{-7}$

علاوه بر این نتیجه مربوط به FT-IR نحوه سنتز و اطمینان از برقراری پیوندهای پلیمر را مورد تأیید قرار دادند. (شکل ۱- ج، د)



- مشخصه‌یابی

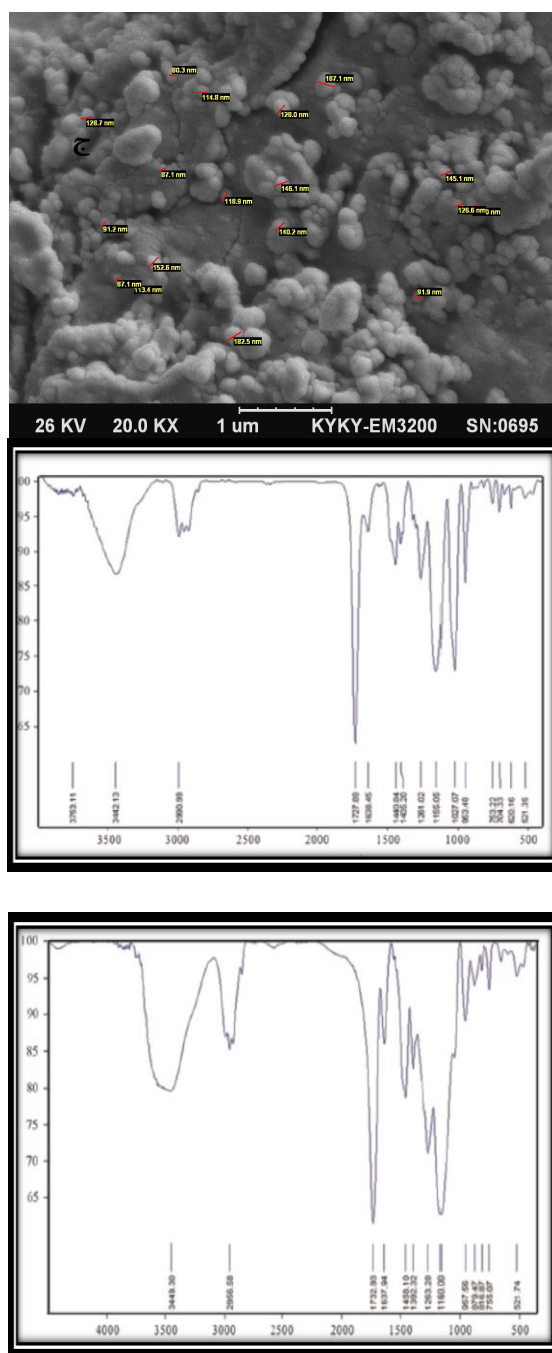
ریخت‌شناسی پلیمرهای قالب مولکولی تهیه شده با استفاده از تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. قابل ذکر است که سایز ذرات پلیمری به دست آمده، بین ۶۲ تا ۹۸ نانومتر می‌باشد. شکل ۱، تصاویر SEM از پلیمر قالب نشده (الف) و همچنین پلیمر قالب ملکولی موردنظر (ب) را نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر، وجود حفرات و تخلخل‌ها در شبکه‌ی پلیمر قالب ملکولی به وضوح قابل رویت است. این حفرات و تخلخل‌ها منجر به افزایش فاکتور سطح تماس در ساختار الکترودها خواهد شد. در ساختار پلیمر قالب نشده هم که حفره‌ای مشاهده نمی‌شود.

-بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در اندازه‌گیری یون نیکل
-بهینه‌سازی ترکیب درصد اجزای به کار برده شده در
خمیر کربن

با توجه به این که بسیاری از پارامترهای مهم یک حسگر الکتروشیمیایی خمیر کربنی، مانند حساسیت و گزینش-پذیری به مقدار بسیار زیادی به نسبت اجزاء به کار رفته در خمیر کربن بستگی دارد به منظور بهینه‌سازی ترکیب درصد اجزای به کار رفته شده در ساختار حسگر Ni^{2+} مربوط به این تحقیق و اثر این مواد بر پاسخ پتانسیلی حسگر حاضر، حسگرهای مختلفی با ترکیب درصدهای متفاوتی ساخته شدند و نتایج در جدول (۲) گزارش شده است.

با توجه به این جدول، حسگر شماره ۱ (حسگر خمیر کربن ساده و اصلاح نشده)، یک پاسخ بسیار ضعیفی از خود نشان می‌دهد. اما با افزایش مقدار اصلاحگر پلیمر قالب مولکولی در بافت خمیر کربن (حسگرهای شماره ۲ و ۳) میزان شیب نرنستی و در نتیجه حساسیت حسگر بهبود یافته است. همین موضوع نشان می‌دهد که مهم‌ترین بخش یک حسگر خمیر کربن، عامل حس‌کننده (که در اینجا پلیمر قالب مولکولی است)، می‌باشد. هرچه تعداد این پلیمر در سطح بیش‌تر باشد سایت‌های خالی بیش‌تری در سطح جذب یون-های نیکل وجود خواهند داشت.

با توجه به جدول (۲) حسگر شماره ۵ با ترکیب درصد ۵۸٪ پودر گرافیت، ۲۵٪ پارافین و ۱۷٪ پلیمر یون‌گزین به عنوان بهترین ترکیب درصد انتخاب شد.



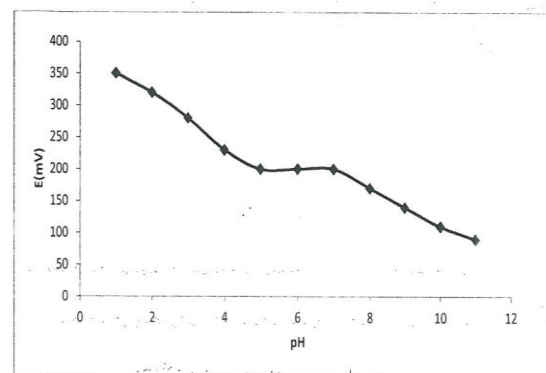
شکل ۱: تصاویر SEM (الف) پلیمر قالب نشده (ب) پلیمر قالب مولکولی نیکل؛ نتایج نمودار FT-IR برای پلیمر نیکل، (ج) IIP شسته نشده، (د) IIP شسته شده

جدول ۲- بهینه‌سازی ترکیب درصد حسگر خمیر کربنی اصلاح شده برای اندازه‌گیری پتانسیومتری نیکل ($\text{pH}=6$)، در محدوده خطی 10^{-1} تا 10^{-7} مول بر لیتر).

شماره الکترود	روغن پارافین	پودر گرافیت	یون گزین (IIP)	شیب نورستی (mV decade^{-1})	R^2
۱	۲۵٪	۷۵٪	۰٪	$8/157 \pm 0/2$	۰/۹۰۰
۲	۲۵٪	۷۰٪	۵٪	$12/27 \pm 0/3$	۰/۹۸۷
۳	۲۵٪	۶۵٪	۱۰٪	$24/67 \pm 0/2$	۰/۹۹۳
۴	۲۵٪	۶۰٪	۱۵٪	$23/27 \pm 0/20$	۰/۹۸۹
۵	۲۵٪	۵۸٪	۱۷٪	$29/06 \pm 0/1$	۰/۹۹۹
۶	۲۵٪	۵۷٪	۱۸٪	$23/47 \pm 0/2$	۰/۹۹۱

بررسی تغییرات pH

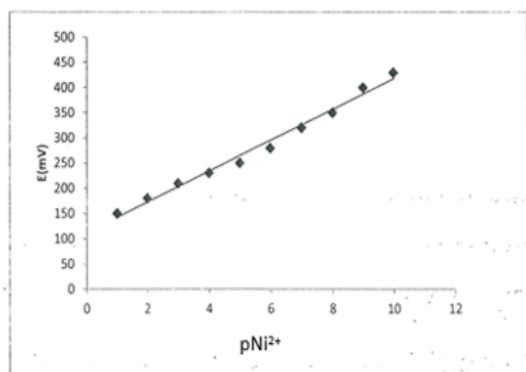
جهت بررسی تأثیر pH، بر روی پاسخ حسگر تهیه شده (جدول ۲، حسگر شماره ۵) پتانسیل حسگر در محدوده‌ی pH بین 10^{-5} تا $11/00$ و در محلول با غلظت $10^{-5} \times 1/00$ مول بر لیتر نیکل بررسی شده است و منحنی تغییرات پتانسیل بر حسب pH، در شکل ۲ رسم شده است. با توجه به شکل، پتانسیل در محدوده $\text{pH}=5-7$ تقریباً ثابت باقی می‌ماند و در بقیه نواحی تغییراتی دارد. در واقع در این محدوده از pH، مزاحمتی ناشی از OH^- و H_3O^+ در پاسخ پتانسیلی حسگر دیده نمی‌شود. تغییرات مشاهده شده در pH های اسیدی (<5)، مربوط به مزاحمت یون H_3O^+ در اثر پروتونه شدن سایت های فعال پلیمر می باشد. بنابراین، حسگر مورد نظر ما، در این محدوده از pH، بهترین کارایی را خواهد داشت. لذا مطالعات بعدی در $\text{pH}=6$ انجام شد.



شکل ۲: نمودار تغییرات pH، غلظت محلول $10^{-5} \times 1/00$ مولار

منحنی کالیبراسیون، گستره‌ی اندازه‌گیری و حد تشخیص

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، حسگر الکتروشیمیایی پیشنهاد شده، در شرایط بهینه یک پاسخ خطی در محدوده خطی 10^{-1} تا 10^{-7} مولار (با معادله خط $R=0/98$ و $y=30/66x+111/3$) می‌دهد. با برونیابی از منحنی کالیبراسیون زیر، حد تشخیص به مقدار $10^{-9} \times 5/00$ مولار به دست می‌آید.



شکل ۳: منحنی کالیبراسیون الکترود نیکل

زمان پاسخ دهی

در این تحقیق، زمان پاسخ‌دهی برای الکترود مورد بحث (جدول ۲، حسگر شماره ۵) با تغییر غلظت Ni^{2+} در محلول، در دامنه‌ی 10^{-7} تا 10^{-4} مولار به دست آمده است. نتایج نشان داد، در تمام گستره‌های انتخاب شده

MIP گزینش پذیری قابل ملاحظه و بسیار بالایی برای اندازه گیری نیکل داشته و حضور مداخله کننده ها خلی در پاسخ آن وارد نکرده است.

جدول ۳- بررسی اثر گونه های مزاحم در اندازه گیری نیکل

یون مزاحم	نسبت غلظت یون های مزاحم به نیکل	درصد بازیابی (%)
Pb ²⁺	۱۰۰۰	۹۶/۱۵
Zn ²⁺	۱۰۰۰	۹۷/۴
Na ⁺	۱۰۰	۹۷/۷۷
K ⁺	۱۰۰	۹۹

- کاربرد حسگر تهیه شده در نمونه حقیقی

به منظور ارزیابی توانایی الکتروکود پیشنهادی در اندازه گیری یون مورد نظر در نمونه های حقیقی، از این الکتروکود به طور موفقیت آمیزی برای اندازه گیری یون مورد نظر در نمونه های آب چاه و آب رودخانه استفاده شده است. داده های به دست آمده برای نمونه های فوق با مقادیر اضافی یون مورد نظر به روش افزایش استاندارد، نتایج بازیابی خوبی را ارائه می کنند. نتایج در جدول (۴) گزارش شده است. همچنین نتایج به دست آمده از این الکتروکود با نتایج به دست آمده از طیف سنجی جذب اتمی الکتروترمال (ET-AAS) مقایسه شده است، که نتایج نشان از عملکرد فوق العاده این الکتروکود دارد.

جدول ۴: نتایج اندازه گیری نیکل در نمونه های آبی

نمونه ها	نیکل اضافه شده (مول بر لیتر)	مقدار نیکل به دست آمده با روش پیشنهادی در این تحقیق ^a (مول بر لیتر)	درصد بازیابی (%) در این تحقیق	مقدار نیکل به دست آمده با (ET-AAS)
آب چاه	-	-	-	7.0×10^{-9}
"	1.5×10^{-7}	$3/4 (\pm 0.20) \times 10^{-8}$	۹۷/۸۰	2.5×10^{-8}
"	3.0×10^{-7}	$5/48 (\pm 0.30) \times 10^{-7}$	۹۸/۶۰	$6/28 \times 10^{-8}$
پساب	-	-	-	$3/41 \times 10^{-9}$
"	1.5×10^{-7}	$9/79 (\pm 0.23) \times 10^{-6}$	۹۷/۸۰	$2/7 \times 10^{-7}$
"	3.0×10^{-7}	$1/46 (\pm 0.20) \times 10^{-7}$	۹۷/۳۰	$3/23 \times 10^{-8}$

^a میانگین سه بار اندازه گیری \pm انحراف استاندارد نتایج

(از رقیق به غلیظ)، الکتروکود در زمان ۵ ثانیه به پاسخ تعادلی خود رسیده است. بنابراین زمان پاسخ دهی حسگر برای غلظت های متفاوت Ni²⁺، ۵ ثانیه می باشد.

- طول عمر و پایداری

به منظور بررسی پایداری و طول عمر الکتروکود مورد بحث، شیب نرنستی الکتروکود، در گستره ی خطی به دست آمده و تحت شرایط بهینه، به صورت دوره ای برای مدت ۱۲ هفته، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که برای مدت ۱۰ هفته، عملکرد حسگر تقریباً بدون تغییر چشمگیری ثابت باقی می ماند. اما بعد از این زمان، شیب به طور محسوسی از $29/32 \text{ mV decade}^{-1}$ به $29/32 \text{ mV decade}^{-1}$ کاهش می یابد. در نتیجه، این حسگر حداکثر به مدت ۱۰ هفته بعد از تهیه آن، دارای پایداری نسبتاً مناسبی بوده و بدون هیچ گونه انحراف در شیب و حد تشخیص، می توان از آن جهت اندازه گیری نیکل استفاده کرد.

- مطالعه ی اثر مداخله کننده ها

به منظور ارزیابی گزینش پذیری، الکتروکود آماده شده تحت شرایط بهینه در محلول های یون های فلزی معمول قرار گرفت. جدول (۳) پاسخ الکتروکود در آزمایشات انجام شده را نشان می دهد. مشاهده می شود که در حضور یون ها (سرب، روی، سدیم و پتاسیم) تداخلی ایجاد نگردیده. بر اساس یافته ها، می توان گفت که الکتروکود اصلاح شده با

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک حسگر الکتروشیمیایی مبتنی بر الکترودهای خمیر کربن اصلاح شده با ذرات پلیمر قالب مولکولی، برای اندازه‌گیری نیکل تهیه شد. کاربرد پلیمرهای قالب ملکولی (MIP) در ساختار حسگر، پاسخ‌گزینش‌پذیری آن را برای تعیین مقدار آنالیت به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. همچنین حضور MIP به دلیل داشتن حفره‌هایی برای جذب اختصاصی آنالیت، ویژگی حسگر جهت آنالیز را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد. حسگر پیشنهادی دارای ویژگی‌هایی از قبیل روش تهیه آسان، تکرارپذیری خوب، گزینش‌پذیری و حساسیت زیاد، دامنه‌ی خطی وسیع و حد تشخیص پایین بوده و به صورت موفقیت‌آمیزی جهت تعیین نیکل در نمونه‌های آب چاه و پساب کارخانه مورد استفاده قرار گرفت.

منابع

- [7] Rajabi, H.R., Razmpour, S., 2016, Synthesis, characterization and application of ion imprinted polymeric nanobeads for highly selective preconcentration and spectrophotometric determination of Ni^{2+} ion in water samples, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 153, 45-52.
- [8] Saraji, M., Yousefi, H., 2009, Selective solid-phase extraction of Ni(II) by an ion-imprinted polymer from water samples, *Journal of Hazardous Materials*, 167, 1152-1157.
- [9] Otero-Romaní, J., Moreda-Piñeiro, A., Bermejo-Barrera, P., Martín-Esteban, A., 2008, Synthesis, characterization and evaluation of ionic-imprinted polymers for solid-phase extraction of nickel from seawater, *Analytica Chimica Acta*, 630, 1-9.
- [10] Afkhami, A., Shirzadmehr, A., Madrakian, T., 2014, Improvement in performance of a hyoscine butyl bromide potentiometric sensor using a new nanocomposite carbon paste: a comparison study with polymeric membrane sensor, *Ionics*, 20, 1145-1154.
- [11] Bagheri, H., Shirzadmehr, A., Rezaei, M., 2015, Designing and fabrication of new molecularly imprinted polymer-based potentiometric nano-graphene/ionic liquid/carbon paste electrode for the determination of losartan, *Journal of Molecular Liquids*, 212, 96-102.
- [12] Shirzadmehr, A., Afkhami, A., Madrakian, T., 2015, A new nano-composite potentiometric sensor containing an Hg^{2+} ion imprinted polymer for the trace determination of mercury ions in different matrices, *Journal of Molecular Liquids*, 204, 227-235.
- [13] Khadem, M., Faridbod, F., Norouzi, P., Rahimi Froushan, A., Ganjali, M.R., Shahtaheri, S.J., 2016, Biomimetic electrochemical sensor based on molecularly imprinted polymer for dicloran pesticide determination in biological and environmental samples, *Journal of the Iranian Chemical Society*, 13, 2077-2084.
- [14] Koochpaei, A.R., Shahtaheri, S.J., Ganjali, M.R., Rahimi Froushani, A., Golbabaie, F., 2008, Application of multivariate analysis to the screening of molecularly imprinted polymers (MIPs) for ametryn, *Talanta*, 75, 978-986.
- [15] Tadayon, F., Katebi, A., Afkhami, A., Panahi, Y., Bagheri, H., 2014, A new potentiometric sensor based on a high-performance composite for nanomolar determination of mercury (II) in environmental samples, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 94, 901-915.
- [16] Blanco Lopez, M., Lobo Castanon, M., Miranda Ordieres, A., Tunon Blanco, P., 2004, Electrochemical sensors based on molecularly imprinted polymers, *Trends in Analytical Chemistry*, 23, 36-48.
- [17] Ebrahimzadeh, H., Moazzen, E., Amini, M., Sadeghi, O., 2012, Novel magnetic ion imprinted polymer as a highly selective sorbent for extraction of gold ions in aqueous samples, *Analytical Methods*, 4, 3232-3237.
- [18] Luo, X., Luo, S., Zhan, Y., Shu, H., Huang, Y., Tu, X., 2011, Novel Cu (II) magnetic ion imprinted materials prepared by surface imprinted technique combined with a sol-gel process, *Journal of Hazardous Materials*, 192, 949-955.
- [19] Hosseini, M., Salavati-Niasari, M., Poursaberi, T., Shamsipur, M., Javanbakht, M., Hashemi, O.R., 2002, Nickel Ion-Selective Coated Graphite PVC-Membrane Electrode Based on Benzylbis (thiosemicarbazone), *Electroanalysis*, 14, 526-531.
- [20] Gupta, V.K., Jain, A.K., Singh, L.P., Khurana, U., 1997, Porphyrins as carrier in PVC based membrane potentiometric sensors for nickel(II), *Analytica Chimica Acta*, 355, 33-41.
- [1] Shahtaheri, S.J., Khadem, M., Golbabaie, F., Rahimi-Froushani, A., 2007, Optimization of sample preparation procedure for evaluation of occupational and environmental exposure to Nickel, *Iranian Journal of Public Health*, 36, 73-81.
- [2] Chen, L.G., Zhang, X.P., Sun, L., Xu, Y., Zeng, Q.L., Wang, H., 2009, Preparation of core-shell magnetic ionimprinted polymer for selective extraction of Pb (II) from environmental samples, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 10073-10080.
- [3] Dursun, A.Y., 2006, A comparative study on determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of biosorption of copper(II) and lead(II) ions onto pretreated *Aspergillus niger*, *Biochemical Engineering Journal*, 28, 187-195.
- [4] Niazi, A., Yazdanipour, A., 2008, Simultaneous spectrophotometric determination of cobalt, copper and nickel using 1-(2-thiazolylazo)-2-naphthol by chemometrics methods, *Chinese Chemical Letters*, 19, 860-864.
- [5] Khani, R., Shemirani, F., 2013, Simultaneous Determination of Trace Amounts of Cobalt and Nickel in Water and Food Samples Using a Combination of Partial Least Squares Method and Dispersive Liquid-Liquid Microextraction Based on Ionic Liquid, *Food Analytical Methods*, 6, 386-394.
- [6] Kubán, P., Strieglerová, L., Gebauer, P., Boček, P., 2011, Electromembrane extraction of heavy metal cations followed by capillary electrophoresis with capacitively coupled contactless conductivity detection, *Electro- and Liquid Phase-Separations - Part I*, 32, 1025-1032.