



شناسایی آفلاتوکسین M1 در شیر به کمک آپتاسنسور الکتروشیمیایی مبتنی بر الکتروود صفحه-چاپی و روش ولتامتری چرخه‌ای

سیده فاطمه احمدی^۱، محمد حجت‌الاسلامی^{۲*}، حسین کیانی^۳، هومان مولوی^۴، سیده خدیجه احمدی^۵

۱-دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

۲-دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

۳-استادیار، آزمایشگاه زیست فراوری و زیست‌سنجش، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴-استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

۵-دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه بهداشت مواد غذایی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۰

کلمات کلیدی:

آپتاسنسور،

بیوسنسور الکتروشیمیایی،

نانو ذرات طلا،

نانو ذرات مغناطیسی،

ولتامتری چرخه‌ای.

DOI: 10.52547/fsct.18.05.02

* مسئول مکاتبات:

mohojjat@gmail.com

شیر از فرایند تولید تا مصرف در معرض آلودگی‌های مختلف میکروبی و شیمیایی قرار دارد. یکی از مهم‌ترین سموم آلوده‌کننده شیر آفلاتوکسین M1 است که به دلیل سرطان‌زا بودن و اثرات مخربی که برای مصرف‌کننده به همراه دارد، همواره موردتوجه بوده است. بنابراین شناسایی سریع، حساس و مقرون به صرفه آفلاتوکسین M1 در شیر امری ضروری است. در پژوهش حاضر، یک آپتاسنسور الکتروشیمیایی مبتنی بر الکتروود صفحه-چاپی اصلاح‌شده با نانو ذرات مغناطیسی و نانو ذرات طلا جهت شناسایی آفلاتوکسین M1 در شیر گاو پیشنهاد گردید. الکتروود صفحه-چاپی با اعمال پتانسیل در محدوده ۱/۵- تا ۱+ ولت در مقابل الکتروود مرجع با سرعت رویش ۲۰۰ میلی ولت بر ثانیه در ۵ سیکل پیوسته در محلول از اسیدسولفوریک ۰/۵ مولار و پتاسیم کلرید ۰/۱ مولار بود فعال شد. به کمک تکنیک ولتامتری چرخه‌ای تغییرات سطح الکتروود در مراحل مختلف آماده‌سازی ارزیابی شد. تحت شرایط بهینه، با استفاده از ولتامتری چرخه‌ای مشخص شد که آپتاسنسور محدوده غلظتی ۷۰۰-۱۰۰ نانوگرم بر لیتر و حد تشخیص ۵۰ نانوگرم بر لیتر را ارائه می‌دهد. رابطه تغییرات پیک جریان با غلظت آنالیت خطی بود و از معادله رگرسیونی $\Delta I = 0.0209C + 2.14$ ($R^2 = 0.9897$) پیروی نمود. محاسبه انحراف استاندارد نسبی ($RSD = 3/2\%$) حاکی از تکرارپذیری قابل قبول آپتاسنسور الکتروشیمیایی بود. برای بررسی تکثیر پذیری انحراف استاندارد نسبی پیک‌های جریان ۷/۴ درصد به دست آمد که نشان از تکثیر پذیری خوب آپتاسنسور الکتروشیمیایی داشت. نتایج نشان داد که پاسخ آپتاسنسور بعد از گذشت ۸ روز تنها ۷ درصد در مقایسه با روز اول، کاهش می‌یابد که نشان از پایداری مطلوب آپتاسنسور دارد. محدوده درصد ریکاوری برای نمونه‌های شیر گاو در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ نانوگرم بر لیتر به ترتیب ۸۶/۵ و ۹۳ درصد به دست آمد که نشان از درصد ریکاوری قابل قبول آپتاسنسور الکتروشیمیایی پیشنهادشده داشت.

۱- مقدمه

مصرف لبنیات مخصوصاً شیر که سرشار از کلسیم، فسفر، پروتئین و اسیدهای آمینه مورد نیاز بوده همواره مورد تأکید بوده است. تحقیقات مختلفی نشان داده‌اند که ارتباط قوی بین مصرف شیر و فرآورده‌های لبنی با کاهش فشارخون، افزایش ضریب هوشی، کاهش ابتلا به انواع بیماری و پیشگیری از پوکی استخوان وجود دارد. از این رو بهداشت و سلامت شیر و فرآورده‌های آن بسیار حائز اهمیت است. مصرف خوراک آلوده توسط دام سبب بروز اختلال در چرخه سلامت دام، شیر و مصرف‌کننده می‌گردد [۱]. شیر در فرایند تولید تا مصرف در معرض آلودگی‌های مختلف میکروبی و شیمیایی قرار دارد. از جمله مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های شیر می‌توان به آفلاتوکسین M1 اشاره نمود. آفلاتوکسین سرطان‌زا بوده و در برابر پاستوریزاسیون مقاوم می‌باشد تا حدی که فرایند های حرارتی اعمال شده برای تولید فرآورده های لبنی نمی‌تواند از میزان پایداری آن بکاهد و در فرآورده هایی مانند ماست و پنیر تا حدی باقی می‌ماند [۲]. تاکنون روش‌های مختلفی برای شناسایی آفلاتوکسین M1 مورد استفاده قرار گرفته است از جمله: کروماتوگرافی مایع با کارایی بال [۲]، الیزا [۳] روش‌های میکروبی [۴]، کروماتوگرافی لایه‌نازک [۵] و کروماتوگرافی مایع-طیف سنجی جرمی [۶]. اگرچه این روش‌ها برای شناسایی آفلاتوکسین M1 حساس، دقیق و اختصاصی هستند اما وقت‌گیر، هزینه‌بر و نیازمند کاربر آموزش‌دیده، تجهیزات حجیم و آماده‌سازی پیچیده نمونه هستند. به دلیل به‌کارگیری آسان، پاسخ سریع، تجهیزات ساده و ارزان قیمت آپتاسنسورهای الکتروشیمیایی توجه ویژه‌ای را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند [۷ و ۸].

آپتاسنسورها در حقیقت سنسورهای الکتروشیمیایی مبتنی بر آپتامر هستند که به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد مثل پایداری عالی، ساختار سه‌بعدی خاص، سازگاری با محیط زیست، سنتز آسان و قابلیت اتصال بالا با آنالیت خود، برای شناسایی آنالیت‌های مختلف همواره مورد توجه بوده‌اند [۹ و ۱۰]. تکنولوژی صفحه-چاپی (Screen-printing) که به صورت اختصاصی برای کاربرد در میکروالکترونیک در نظر گرفته می‌شود، به‌طور قابل توجهی در ساخت الکترودها برای بیوسنسورهای الکتروشیمیایی یک‌بار مصرف و از قبل آماده شده نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. فناوری صفحه-چاپی

تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ظریف سازی سیستم‌ها و حسگرهای الکتروشیمیایی داشته است و جایگزین روش‌های سنتی و حجیم قدیمی شده و با تولید انبوه حسگرهای نواری یکبار مصرف همراه با دستگاه‌های الکترونیکی کوچک، توانسته پاسخگوی این نیاز باشد [۱۲]. یک الکتروده صفحه چاپی (SPE) ویژگی‌هایی از جمله: ساده، ارزان، قابل حمل، استفاده آسان و اندازه کوچک را دارد. علاوه بر این، در الکتروده صفحه چاپی فرایند تمیز کردن برخلاف الکترودهای معمولی مانند الکتروده کربن شیشه‌ای حذف می‌شود [۱۳]. الکتروده صفحه چاپی برخلاف اکثر سیستم‌های دو و یا سه الکترودی مرسوم که به‌طور مکرر نیازمند کالیبراسیون مجدد هستند و نیاز به شست و شو دارند، این محدودیت‌ها را ندارد [۱۴] و [۱۵]. این مشکلاتی که در کار با سیستم‌های الکترودی مرسوم وجود دارد باعث شده تا کاربردهای کمتری در مقایسه با الکترودهای صفحه چاپی داشته باشند [۱۵]. الکترودهای صفحه چاپی، بصورت انبوه بر روی بستر مناسب چاپ می‌شوند. هر نوار حسگر از اجزای مختلفی نظیر بستر، مدار اتصال، الکتروده کار، الکتروده مرجع، الکتروده کمکی و لایه عایق تشکیل شده که به ترتیب و بصورت جداگانه بر روی بستر چاپ می‌شوند [۱۶].

به منظور بهبود عملکرد آپتاسنسورهای الکتروشیمیایی معمولاً از نانو مواد استفاده می‌گردد. در میان نانو مواد مختلف، نانو ذرات مغناطیسی به علت افزایش سطح الکتروده و هدایت الکترونیکی و همچنین بهبود فرایند انتقال الکترون در سطح الکتروده در آپتاسنسورهای الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]. نانو ذرات طلا نیز به خاطر ساختار منحصر به فرد، پایداری عالی و نسبت سطح به حجم بالا برای کاربرد در آپتاسنسورهای الکتروشیمیایی ایده آل هستند. ترکیب نانو ذرات مغناطیسی و نانو ذرات طلا فرایند الکترون و هدایت الکترونیکی را بیشتر افزایش می‌دهد [۱۸].

با توجه به اهمیت توسعه روش‌های سریع و اختصاصی در زمینه امنیت و بهداشت مواد غذایی از جمله شیر، در مطالعه حاضر یک آپتاسنسور الکتروشیمیایی ولتامتریک مبتنی بر الکتروده صفحه-چاپی اصلاح شده با نانو ذرات مغناطیسی و نانو ذرات طلا به منظور سنجش غلظت AFM1 در نمونه‌های شیر بعنوان یک روش کارآمد، سریع و مقرون به صرفه معرفی شد. نقطه بحرانی این آپتاسنسور اثر مضاعف در افزایش نرخ انتقال الکترون و روند تشخیص آنالیت بدلیل استفاده همزمان از دو

ولت در مقابل الکتروود مرجع در محلولی که ترکیبی از اسیدسولفوریک و پتاسیم کلرید بود فعال‌سازی شد [۲۱ و ۲۲].

۲-۴-آماده‌سازی و تثبیت نانو ذرات مغناطیسی

در این مطالعه نانو ذرات مغناطیسی به روش هم رسوبی تهیه شد [۲۳]. بطور خلاصه، برای این منظور کلرید آهن(II) و (III) در اتمسفری از نیتروژن در دمای ۸۵ درجه سلسیوس در آب دو بار تقطیر حل شدند. قبل از شروع آزمایش‌ها نانوذره مغناطیسی در متانول حل و در معرض اولتراسونیک قرار گرفت. برای تثبیت نانو ذرات مغناطیسی میزان ۴ میکرو لیتر بر روی سطح الکتروود کاری چکانده شد و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق خشک شد [۲۴].

۲-۵-تثبیت نانو ذرات طلا

تثبیت نانو ذرات طلا به روش رسوب‌دهی الکتریکی انجام شد. در این راستا بعد از فعال‌سازی الکتروود صفحه چاپی و تثبیت نانو ذرات مغناطیسی بر روی آن، در پتانسیل ۰/۳- ولت درون محلول $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ در زمان‌های مختلف رسوب‌دهی (۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ ثانیه) تکنیک ولتامتری چرخه‌ای اعمال گردید. پس از آن تکنیک ولتامتری چرخه‌ای برای الکتروود اصلاح‌شده با نانو ذرات مغناطیسی و نانو ذرات طلا درون محلول نیترات پتاسیم در محدوده ۰/۵- تا ۱/۵+ ولت انجام گرفت.

۲-۶-تثبیت آپتامر

جهت تثبیت آپتامر از توالی اختصاصی آفلاتوکسین M1 با ۲۱ نوکلئوتید (5'-SH-ACT GCT AGA GAT TTT) (CCA CAT-3') با HPLC، وزن مولکولی ۶۷۰۹/۰۳ که توسط شرکت Bioneer (Daejeon, South Korea) سنتز شده بود، استفاده شد. ابتدا توالی آفلاتوکسین M1 در آب دیونیزه رقیق شد و سپس در دمای ۲۰- درجه سلسیوس نگهداری شد. برای شکستن پیوندهای دی سولفیدی آپتامر، دی تیو تریتول با نسبت حجمی ۱:۵ به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق به آن اضافه شد. سپس غلظت ۶ میکرو مولار بر روی سطح الکتروود کاری چکانده شد و در دمای اتاق خشک شد. بعد از تثبیت آپتامر، الکتروود اصلاح‌شده با نانو ذرات مغناطیسی و نانو ذرات طلا، آفلاتوکسین M1 چکانده شده و در دمای اتاق خشک شد.

نانو ذره بوده، بعلاوه استفاده از آپتامر بعنوان یک مولکول زیستی، موجب افزایش قابلیت اتصال به آنالیت در سنسور گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱-سیستم اندازه‌گیری

کلید بررسی‌های الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات که از یک طرف با الکتروود صفحه-چاپی و از طرف دیگر با رایانه ارتباط داشت انجام شد. از الکتروود کربن به‌عنوان الکتروود کاری با مساحت مؤثر ۷/۰۷ میلی‌متر مربع، نقره به‌عنوان الکتروود مرجع و کربن به‌عنوان الکتروود کمکی استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام گردید. در شکل (۱) تصویر واقعی الکتروود صفحه-چاپی آورده شده است.

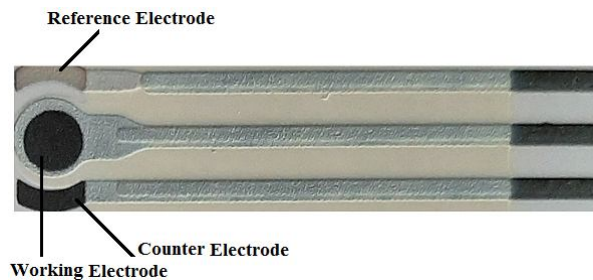


Fig 1 Real image of the screen-printed electrode (SPE) used.

۲-۲-تکنیک ولتامتری چرخه‌ای

تکنیک ولتامتری چرخه‌ای روشی مؤثر و کاربردی برای به دست آوردن اطلاعات مهم از مکانسیم واکنش‌ها و رفتارهای الکتروشیمیایی در سطح الکتروود کاری در محفظه الکتروشیمیایی است. در این مطالعه به‌منظور فعال‌سازی الکتروود صفحه-چاپی و مطالعه رفتار الکتروشیمیایی مراحل مختلف اصلاح الکتروود درون محلول ۱ میلی مولار فری-فروسیانید در محدوده پتانسیل ۰/۳- تا ۰/۷ ولت استفاده گردید.

۲-۳-فعال‌سازی الکتروود صفحه-چاپی

مطالعات بسیاری فرایند فعال‌سازی را قبل از مشخصه یابی الکتروود کاری به‌خصوص الکتروود صفحه-چاپی در تحلیل‌های الکتروشیمیایی پیشنهاد کرده‌اند [۱۹ و ۲۰]. برای این هدف، قبل از اصلاح سطح الکتروود با نانو ذرات مغناطیسی و طلا، الکتروود صفحه-چاپی با اعمال پتانسیل در محدوده ۱/۵- تا ۱+

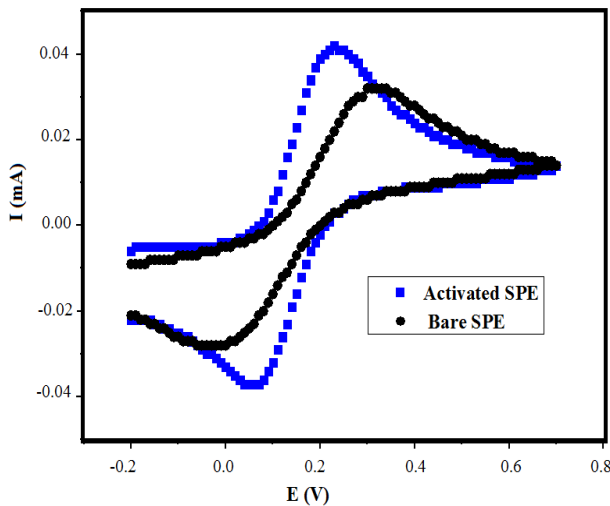


Fig 2 Cyclic voltammograms of activated and bare SPEs.

۲-۳- بهینه‌سازی زمان تثبیت نانو ذرات طلا

رسوب نانو ذرات طلا به دلیل نقش حساسی که در شناسایی و تحلیل آنالیت‌های مختلف دارند بسیار مهم است. زمان رسوب‌دهی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر اندازه و مقدار رسوب نانو ذرات طلا روی الکتروود صفحه چاپی داشته باشد [۱۳]. ولتاگرام چرخه‌ای در شکل (۳) برای زمان‌های مختلف نشان داده شده است. با افزایش زمان رسوب‌دهی پیک اکسایش و کاهش از ۶۰ تا ۱۵۰ ثانیه افزایش یافته و در ۱۸۰ ثانیه کاهش یافته است (شکل ۴). برای اطمینان از رفتار الکتروشیمیایی بهتر الکتروود صفحه-چاپی، زمان ۱۵۰ ثانیه با توجه به حداکثر پیک جریان به دست آمده برای آن، به عنوان زمان بهینه برای رسوب‌دهی نانو ذرات طلا انتخاب گردید.

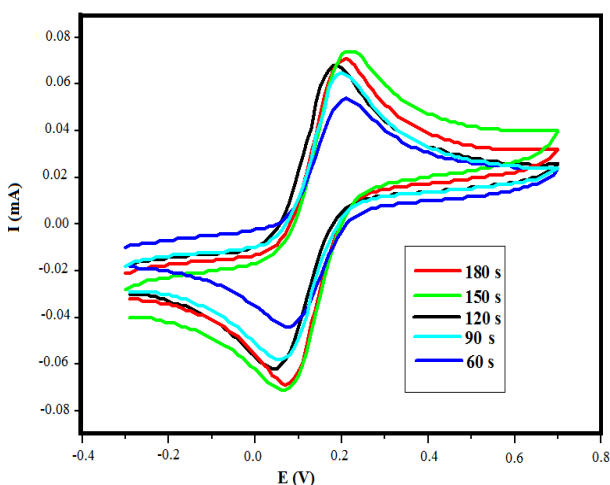


Fig 3 Cyclic voltammograms of GNPs modified SPE with different deposition time from 60 s to 180 s in 1.0 mM $K_3Fe(CN)_6 / K_4Fe(CN)_6$ (0.1 M KCl).

۲-۷- آماده‌سازی نمونه‌های شیر

از نمونه های شیر گاو که از یک فروشگاه محلی تهیه شده بود، به عنوان نمونه حقیقی استفاده گردید. سپس آفلاتوکسین M1 با غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ نانوگرم بر لیتر به نمونه‌ها تزریق گردید و به مدت ۳۰ دقیقه در شرایط حمام آب (۴۰ درجه سلسیوس) قرار گرفت. بعدازآن در متانول رقیق شد و با دور ۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. با محاسبه درصد ریکاوری از نسبت مقدار شناسایی شده به مقدار تزریق شده، عملکرد آبتانسور الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر فعال‌سازی الکتروود صفحه-چاپی بر

جریان

همان‌طور که در بخش ۲-۳ اشاره شد فعال‌سازی الکتروود کاری از جنس صفحه-چاپی ضروری است. به همین دلیل اثر فعال‌سازی الکتروود صفحه-چاپی در سولفوریک اسید و ضرورت آن در این بخش مورد بحث قرار گرفته است. قبل از فعال‌سازی، الکتروود صفحه-چاپی توسط روش ولتامتری چرخه‌ای در محدوده -0.2 تا 0.7 ولت در محلول ۱ میلی مولار فری-فرو سیانید با سرعت روبش ۵۰ میلی ولت بر ثانیه مشخصه یابی شد. متعاقباً فرایند فعال‌سازی محدوده $-1/5$ تا $+1$ در محلول اسیدسولفوریک و پتاسیم کلرید انجام شد و به‌طور مشابه ولتاگرام چرخه‌ای در محدوده -0.2 تا 0.7 ولت در محلول ۱ میلی مولار فری-فرو سیانید برای آن ثبت گردید. با فعال‌سازی الکتروود، لایه‌های اکسیداسیون حذف و سطوح با مکان‌های فعال بیشتری در سطح الکتروود صفحه-چاپی در مقایسه با الکتروود فعال نشده مشاهده شد که برای بهبود عملکرد الکتروشیمیایی آبتانسورها کاربردی هستند [۲۱] و [۲۵]. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است پیک جریان برای الکتروود صفحه-چاپی فعال نشده و فعال شده به ترتیب ۳۲ و $41/5$ میلی‌آمپر به دست آمد که با فعال‌سازی، پیک جریان ۳۰ درصد در مقایسه با حالت قبل افزایش یافته است.

جایگاه‌های فعال از طریق اتصال به آپتامر پیک جریان در مقایسه با حالت قبل (تثبیت آپتامر) کاهش بیشتری یافت.

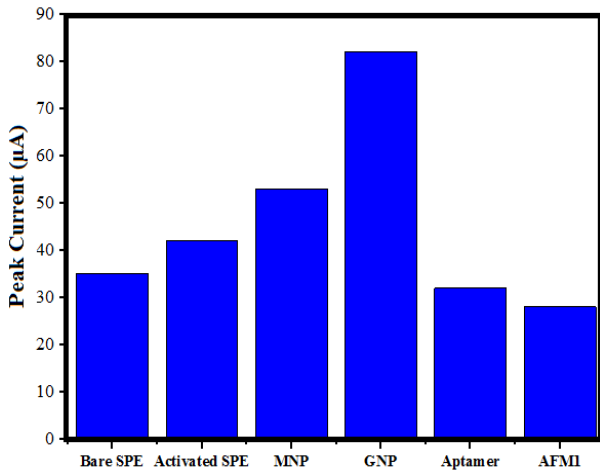


Fig 5 Peak current obtained by CV method for bare SPE, activated SPE, magnetic nanoparticle (MNP), gold nanoparticle (GNP), Aptamer, and Aflatoxin M1 (AFM1)

۳-۴-۶- منحنی کالیبراسیون

با استفاده از تکنیک ولتامتری چرخه‌ای، منحنی کالیبراسیون بر تفاضل پیک جریان در قبل و بعد از تثبیت آفلاتوکسین M1 ترسیم شد. محور عمودی تغییرات پیک جریان بر حسب میکرو آمپر و محور افقی غلظت‌های مختلف AFM1 را نشان می‌دهد (شکل ۶). منحنی کالیبراسیون رنج غلظت خطی ۷۰۰-۱۰۰ نانوگرم بر لیتر را ارائه داد. همچنین رابطه خطی بین غلظت و تغییرات پیک جریان از رابطه (۱) تبعیت نمود:

$$R^2 = 0.9897 \quad y = 0.0209.x + 2.14 \quad (1) \quad \text{رابطه}$$

که در آن y نشان‌دهنده تغییرات پیک جریان بر حسب میکرو آمپر و x غلظت آنالیت است. به‌منظور محاسبه حد تشخیص (LOD) از رابطه (۲) استفاده شد.

$$\text{Limit of detection} = 3S_{\text{blank}}/a \quad (2) \quad \text{رابطه}$$

در رابطه ۲، LOD، حد تشخیص کمی، S_{blank} انحراف استاندارد نمونه شاهد (بدون حضور آفلاتوکسین M1) a شیب منحنی کالیبراسیون در محدوده غلظت خطی است. طبق رابطه (۲)، حد تشخیص برای شناسایی AFM1 ۵۰ نانوگرم بر لیتر تخمین زده شد.

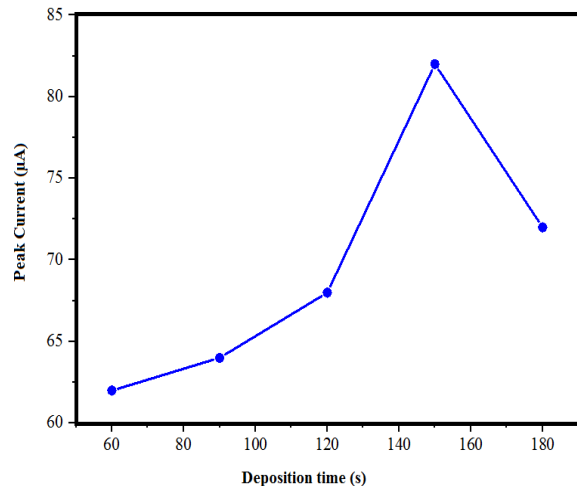


Fig 4 Curve of reduction current vs deposition time

۳-۳- بررسی رفتار الکتروشیمیایی

به‌منظور بررسی عملکرد آپتاسنسور الکتروشیمیایی پیشنهادی از روش ولتامتری چرخه‌ای استفاده شد. در شکل (۵)، پیک جریان مربوط به روش ولتامتری چرخه‌ای در مراحل مختلف آماده‌سازی شامل الکتروود فعال نشده، الکتروود فعال شده، تثبیت نانو مغناطیسی، نانو ذرات طلا، آپتامر و آفلاتوکسین M1 درون محلول حاوی ۱ میلی مولار فری- فرو سیانید با ۰/۱۰ مولار پتاسیم کلرید، با سرعت روبش ۵۰ میلی ولت بر ثانیه آورده شده است. بر طبق شکل (۵) بعد از فعال‌سازی الکتروود، پیک جریان از ۳۵ میکرو آمپر به ۴۱ میکرو آمپر افزایش یافته است. با تثبیت نانو ذرات مغناطیسی بر روی الکتروود کاری کربن پیک جریان به دلیل افزایش فرایند انتقال الکترون از ۴۱ به ۵۳ میکرو آمپر افزایش پیدا کرد. با قرار گرفتن نانو ذرات طلا، روی الکتروود اصلاح‌شده با نانو ذرات مغناطیسی پیک جریان مربوط به الکتروولیت فری- فرو سیانید از ۵۳ به ۸۲ میکرو آمپر افزایش یافت که علت آن را می‌توان در هدایت الکترونیکی بالای نانو ذرات طلا نسبت به نانو ذرات مغناطیسی دانست که با نتایج Tig و همکاران ۲۰۲۰ مطابقت دارد. با تثبیت آپتامر بر روی سطح الکتروود اصلاح‌شده با نانو ذرات مغناطیسی و نانو ذرات طلا، پیک جریان به دلیل دفعه الکترواستاتیک بین فری- فرو سیانید و آپتامر که هر دو دارای بار منفی هستند تا ۳۲ میکرو آمپر کاهش پیدا کرد. با قرار گرفتن آفلاتوکسین M1 بر روی سطح الکتروود اصلاح‌شده با نانو ذرات مغناطیسی، نانو ذرات طلا و آپتامر به دلیل پر شدن

گردید که تکثیر پذیری آپتاسنسور نسبتاً قابل قبول است. اثر مدت زمان ذخیره سازی آپتاسنسور بر داده های پیک جریان به منظور بررسی پایداری آپتاسنسور مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی پایداری زیست حسگر، ابتدا الکتروود کاری با نانو ذرات مغناطیسی و طلا اصلاح شد. سپس به ۲ میکرو لیتر از محلول آپتامر با غلظت ۶ میکرو مولار بر روی آن چکانده شد و به مدت ۸ روز در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری گردید. با اندازه گیری داده های پیک جریان بعد از گذشت ۸ روز مشخص گردید که آپتاسنسور توانسته است ۹۳ درصد از پاسخ اولیه خود را حفظ کند. بنابراین می توان گفت که پایداری آپتاسنسور تا ۸ روز با مقایسه پاسخ اولیه و نهایی قابل قبول است. Kaur و همکاران ۲۰۱۹ نتایج مشابهی در رابطه با بررسی عملکرد آپتاسنسور الکتروشیمیایی ساخته شده جهت شناسایی اکرآتوکسین A ارائه دادند [۹].

۳-۶- آنالیز نمونه های حقیقی

کاربرد عملی آپتاسنسور ساخته شده برای شناسایی آفلاتوکسین در شیر گاو مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا آپتاسنسور در شرایط بهینه ساخته شد و نمونه شیر به حجم ۲ میکرو لیتر با غلظت های مشخصی از آنالیت (۱۰۰ و ۲۰۰ نانوگرم بر لیتر) بر روی الکتروود کاری چکانده شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق خشک شد، سپس روش ولتامتری چرخه ای درون محلول فری-فروسانید برای آن ثبت گردید. درصد ریکاوری از نسبت غلظت اندازه گیری شده به غلظت تزریق شده محاسبه گردید. همان طور که در جدول (۱) آورده شده است محدوده ریکاوری برای نمونه های شیر ۸۶/۵ تا ۹۳ درصد برای ۱۰۰ و ۲۰۰ نانوگرم بر لیتر حاصل شد که حاکی از درصد ریکاوری مطلوب آپتاسنسور پیشنهادی دارد.

Table 1 Detection of AFM1 using aptasensor in real samples.

Actual sample	Spiked (ng/L)	measured (ng/L)	Recovery (%)
Cow milk	100	86.5	86.5
	200	186	93.0

رایانه که با نانو مواد شامل نانو ذرات مغناطیسی و نانو ذرات طلا اصلاح شده بود، استفاده شد. بعد از چکاندن آپتامر اختصاصی و آنالیت بر روی سطح الکتروود کاری از جنس کربن اصلاح شده، از تکنیک ولتامتری چرخه ای برای پایش رفتار الکتروشیمیایی تغییرات سطح الکتروود در مراحل مختلف بهره برده شد. به طور کلی نتایج نشان داد که نانو ذرات و

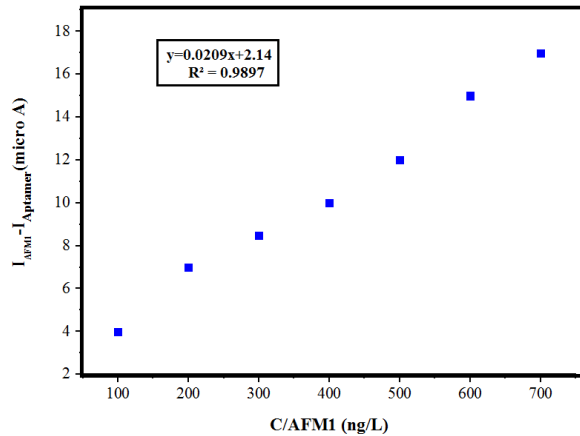


Fig.6 Calibration plot using voltametric data for the aptasensor in the presence of different concentrations of AFM1 (100, 200, 300, 400, 500, 600 and 700 ng/L).

۳-۵- تکرار پذیری، تکثیر پذیری و پایداری آپتاسنسور

جهت ارزیابی تکرار پذیری آپتاسنسور، ابتدا یک الکتروود نانو ذرات مغناطیسی و طلا بر روی آن تثبیت شده بودند، آپتامر و آنالیت تحت شرایط مشخص بر روی آن چکانده شدند. با اندازه گیری درصد انحراف استاندارد نسبی (۳/۲) با استفاده از روش ولتامتری چرخه ای، تکرار پذیری آپتاسنسور برای شناسایی آفلاتوکسین تأیید گردید.

به منظور سنجش تکثیر پذیری آپتاسنسور، ابتدا چهار الکتروود به صورت کاملاً مستقل تحت شرایط یکسان ساخته شد. برای این منظور، ابتدا نانو ذرات مغناطیسی و طلا و سپس محلول آپتامر بر روی آن تثبیت شدند. در ادامه ۲ میکرو لیتر از محلول آنالیت بر روی آن چکانده شد و در دمای اتاق خشک شد. با اندازه گیری انحراف استاندارد نسبی (۷/۴ درصد) مربوط به پیک جریان با استفاده از روش ولتامتری چرخه ای، مشخص

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک آپتاسنسور الکتروشیمیایی اقتصادی، پرتابل، تکثیر پذیر، تکرار پذیر و پایدار برای شناسایی حساس و دقیق آفلاتوکسین M1 پیشنهاد شد. برای ساختن آپتاسنسور الکتروشیمیایی از یک الکتروود صفحه چایی به عنوان سیستم اندازه گیری متصل به دستگاه پتانسیواستات به عنوان مبدل و

- quencher. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 128049.
- [8] He, L., Shen, Z., Wang, J., Zeng, J., Wang, W., Wu, H., & Gan, N., 2020, Simultaneously responsive microfluidic chip aptasensor for determination of kanamycin, aflatoxin M1, and 17 β -estradiol based on magnetic tripartite DNA assembly nanostructure probes, *Microchimica Acta*, 187(3), 1-11.
- [9] Kaur, N., Bharti, A., Batra, S., Rana, S., Rana, S., Bhalla, A., Prabhakar, N., 2019, An electrochemical aptasensor based on graphene doped chitosan nanocomposites for determination of Ochratoxin A, *Microchemical Journal*, 144, 102-109.
- [10] Kang, M., Li, Z., Hu, M., Oderinde, O., Hu, B., He, L., & Du, M., 2020, Bimetallic MnCo oxide nanohybrids prepared from Prussian blue analogue for application as impedimetric aptasensor carrier to detect myoglobin, *Chemical Engineering Journal*, 125117.
- [11] Azri, F. A., Eissa, S., Zourob, M., Chinnappan, R., Sukor, R., Yusof, N. A., & Jinap, S., 2020, Electrochemical determination of zearalenone using a label-free competitive aptasensor, *Microchimica Acta*, 187, 1-10.
- [12] Tangkuaram, T., Ponchio, C., Kangkasomboon, T., Katikawong, P., & Veerasai, W., 2007, Design and development of a highly stable hydrogen peroxide biosensor on screen printed carbon electrode based on horseradish peroxidase bound with gold nanoparticles in the matrix of chitosan, *Biosensors and Bioelectronics*, 22(9-10), 2071-2078.
- [13] Renedo, O. D., & Martinez, M. J. A., 2007, Anodic stripping voltammetry of antimony using gold nanoparticle-modified carbon screen-printed electrodes, *Analytica chimica acta*, 589(2), 255-260.
- [14] Renedo, O. D., Alonso-Lomillo, M. A., & Martínez, M. A., 2007, Recent developments in the field of screen-printed electrodes and their related applications, *Talanta*, 73(2), 202-219.
- [15] Thiyagarajan, N., Chang, J. L., Senthilkumar, K., & Zen, J. M., 2014, Disposable electrochemical sensors: A mini review, *Electrochemistry communications*, 38, 86-90.
- [16] Chan, K. F., Lim, H. N., Shams, N., Jayabal, S., Pandikumar, A., & Huang, N. M., همچنین آپتامر به صورت موفقیت آمیزی بر روی سطح الکتروود کاری تثبیت شده‌اند. بررسی مشخصه‌های عملکردی آپتاسنسور شامل تکراری پذیری، تکثیر پذیری و پایداری قابلیت آپتاسنسور الکتروشیمیایی را برای شناسایی دقیق و حساس آفلاتوکسین M1 تأیید کرد. آنالیز نمونه‌های شیر حاوی آفلاتوکسین M1 با استفاده از آپتاسنسور الکتروشیمیایی نیز محدوده درصد ریکاوری قابل قبول را نشان داد.

۵- منابع

- [1] Ranjbar, S., Noori, M., Nazari, R., 2010, Study of milk aflatoxin M1 and its relationship with feed fungi flora in Markazi Province, *Journal of Cell & Tissue*, 1(1), 9-18 (in Persian).
- [2] da Silva Alves, A. M., de Souza Lima, P. H., da Costa, M. A. S., da Silva, C. B., dos Santos Sousa, J., Pereira, D. D. S. T., & de Freitas, J. D., 2018, Determination of aflatoxin M1 in bovine milk from the Alagoas/Brazil State dairy belt by high performance liquid chromatography (HPLC), *African Journal of Microbiology Research*, 12(25), 580-586.
- [3] Schwartzbord, J., Severe, L., & Brown, D., 2017, Detection of trace aflatoxin M1 in human urine using a commercial ELISA followed by HPLC, *Biomarkers*, 22(1), 1-4.
- [4] Assaf, J. C., Nahle, S., Chokr, A., Louka, N., Atoui, A., & El Khoury, A., 2019, Assorted methods for decontamination of aflatoxin M1 in milk using microbial adsorbents, *Toxins*, 11(6), 304.
- [5] Scussel, V. M., 2003, Comparison of methods by TLC and HPTLC for determination of aflatoxin M1 in milk and B1 in eggs, *Food Science and Technology*, 23, 46-52.
- [6] Wang, H., Zhou, X. J., Liu, Y. Q., Yang, H. M., & Guo, Q. L., 2011, Simultaneous determination of chloramphenicol and aflatoxin M1 residues in milk by triple quadrupole liquid chromatography– tandem mass spectrometry, *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(8), 3532-3538.
- [7] Niazi, S., Khan, I. M., Yu, Y., Pasha, I., Lv, Y., Mohsin, A., & Wang, Z., 2020, A novel fluorescent aptasensor for aflatoxin M1 detection using rolling circle amplification and g-C3N4 as fluorescence

- [21] Wan, H., Sun, Q., Li, H., Sun, F., Hu, N., & Wang, P, 2015, Screen-printed gold electrode with gold nanoparticles modification for simultaneous electrochemical determination of lead and copper, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 209, 336-342.
- [22] Istamboulié, G., Paniel, N., Zara, L., Granados, L. R., Barthelmebs, L., & Noguera, T, 2016, Development of an impedimetric aptasensor for the determination of aflatoxin M1 in milk, *Talanta*, 146, 464-469.
- [23] Radoń, A., Drygała, A., Hawelek, Ł., & Łukowicz, D, 2017, Structure and optical properties of Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by co-precipitation method with different organic modifiers, *Materials Characterization*, 131, 148-156.
- [24] Hemmati, M. H., & Ekrami-Kakhki, M. S, 2018, Electrochemical sensor for sulfite determination based on a nanostructured Fe₃O₄ modified electrode, *Analytical & bioanalytical electrochemistry*, 10(5), 576-586.
- [25] Su, W. Y., Wang, S. M., & Cheng, S. H, 2011, electrochemically pretreated screen-printed carbon electrodes for the simultaneous determination of aminophenol isomers, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 651(2), 166-172.
- 2016, Fabrication of graphene/gold-modified screen-printed electrode for detection of carcinoembryonic antigen, *Materials Science and Engineering: C*, 58, 666-674.
- [17] Fang, S., Dong, X., Liu, S., Peng, D., He, L., Wang, M., & Zhang, Z, 2016, A label-free multi-functionalized electrochemical aptasensor based on a Fe₃O₄@ 3D-rGO@ plasma-polymerized (4-vinyl pyridine) nanocomposite for the sensitive detection of proteins in whole blood, *Electrochimica Acta*, 212, 1-9.
- [18] Tığ, G. A., & Pekyardımcı, Ş, 2020, An electrochemical sandwich-type aptasensor for determination of lipocalin-2 based on graphene oxide/polymer composite and gold nanoparticles, *Talanta*, 210, 120666.
- [19] Bernalte, E., Sánchez, C. M., & Gil, E. P, (2011), Determination of mercury in ambient water samples by anodic stripping voltammetry on screen-printed gold electrodes, *Analytica chimica acta*, 689(1), 60-64.
- [20] Rueda-Holgado, F., Bernalte, E., Palomo-Marín, M. R., Calvo-Blazquez, L., Cereceda-Balic, F., & Pinilla-Gil, E, (2012), Miniaturized voltammetric stripping on screen printed gold electrodes for field determination of copper in atmospheric deposition, *Talanta*, 101, 435-439.



Scientific Research

Detection of aflatoxin M1 in milk using electrochemical aptasensor based on screen printed electrode and cyclic voltammetry method

Ahmadi, S. F. ¹, Hojatoleslami, M. ^{2*}, Kiani, H. ³, Molavi, H. ⁴, Ahmadi, S. Kh. ⁵

1. PHD Student, Department of Food Science and Technology, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.
2. Assoc. Prof., Department of Food Science and Technology, Shahrekord branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.
3. Assist. Prof., Bioprocessing and Biodetection Lab, Department of Food science and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran. Assist.
4. Assist. Prof., Department of Food Science and Technology, Shahrekord branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.
5. M.Sc. Student, Department of Health and Food Quality Control, Faculty of Veterinary Medicine, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 2020/ 10/ 06
Accepted 2020/ 11/ 10

Keywords:

Aptasensor,
Electrochemical Biosensor,
Gold Nanoparticles,
Magnetic Nanoparticles,
Cyclic Voltammetry.

DOI: 10.52547/fsct.18.05.02

*Corresponding Author E-Mail:
mohojjat@gmail.com

Milk, from its production to consumption, is exposed to a variety of microbial and chemical contaminants. Aflatoxin M1 (AFM1) is one of the most important contaminants in milk, which has always received attention due to its carcinogenic and destructive effects on the consumer. Accordingly, the rapid, sensitive, and cost-effective identification of AFM1 in milk is essential. In the present paper, an *electrochemical aptasensor based on screen printed electrode (SPE) modified with magnetic nanoparticles (MNPs) and gold nanoparticles (AuNPs)* was proposed to identify AFM1 in cow milk samples. SPE was activated by applying a potential within the range of -1.5 to +1 V versus the reference electrode at a scan rate of 200 mV/s for 5 continuous cycles in the 0.5 M sulfuric acid and 0.1 M potassium chloride solution. Changes of the electrode surface at different stages of preparation were assessed using cyclic voltammetry (CV) technique. Using CV in optimal conditions, it was found that the aptasensor presents a concentration range of 100-700 ng/l and a limit of detection (LOD) of 50 ng/l. There was a linear relationship between changes of the current peak (ΔI) and analyte concentration. This relationship follows the regression equation of $\Delta I = 0.0209C + 2.14$ ($R^2 = 0.9897$). Calculation of the relative standard deviation (RSD=3.2%) indicated the acceptable repeatability of the electrochemical aptasensor. The current peak was obtained to be 7.4% in the investigation of RSD reproducibility, indicating the good reproducibility of the electrochemical aptasensor. The obtained results showed that the aptasensor response after 8 days has only reduced by 7% compared to the first day, indicating the desirable stability of the aptasensor. The recovery percentage range for cow milk samples at concentrations of 100 and 200 ng/l was obtained to be 86.5 and 93%, respectively, showing the acceptable recovery percentage of the electrochemical aptasensor.