



Semnan University



Research Article

Electrochemical measurement of the anticancer drug epirubicin in injection and serum samples using a carbon paste electrode modified with NiO/carbon nanotube nanocomposite

Hassan Karimi-Maleh ^{a,*} and Najmeh Zare ^b

^a School of Chemistry, Damghan University, Damghan 36716-45667, Iran

^b School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China

PAPER INFO

Article history:

Received: 08/Feb/2025

Revised: 01/Dec/2025

Accepted: 24/Dec/2025

Keywords:

Epirubicin,
Modified Electrode,
NiO/CNTs nanocomposite,
Sensor.

ABSTRACT

In this research work, NiO/carbon nanotube nanocomposite (NiO/CNTs) was synthesized using direct deposition method and characterized using Transmission electron microscopy (TEM) and elemental analysis (EDS). Then, carbon paste electrode modified with NiO/CNTs nanocomposite with optimal weight percentage (10% w/w) was prepared and the designed sensor was used to investigate the electrochemical behavior of epirubicin. The results showed that the highest sensitivity was achieved under neutral conditions. The designed sensor detected epirubicin well in the concentration range of 0.01-320 μ M and a detection limit of 8 nM was obtained for the measurement of epirubicin on the surface of the new sensor. The modified sensor has shown good catalytic ability in increasing the oxidation current as well as reducing the drug overvoltage. Finally, the proposed sensor was used to measure epirubicin in injection and dextrose saline samples and the results showed a recovery percentage of 97.4%-102.8%, which is acceptable for a new sensor.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.36848.2343>

© 2026 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Assistant Professor of Analytical Chemistry. E-mail address: h.karimi.maleh@gmail.com

How to cite this article: Karimi-Maleh, H. & Zare, N. (2026). Electrochemical measurement of the anticancer drug epirubicin in injection and serum samples using a carbon paste electrode modified with NiO/carbon nanotube nanocomposite. *Applied Chemistry Today*, 21(78), 9-20. (in Persian)

اندازه گیری الکتروشیمیایی داروی ضدسرطان اپی رویسین در نمونه های آمپول و سرم با استفاده الکتروکود خمیر کربن اصلاح شده با نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی

حسن کریمی مله^{۱*} و نجمه زارع^۲

^۱ دانشکده شیمی، گروه شیمی تجزیه، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

^۲ دانشکده علوم محیطی، دانشگاه علوم و الکترونیک چین، چنگدو، چین

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰	در این کار تحقیقاتی، نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی با استفاده از روش رسوب دهی مستقیم سنتز و با استفاده از روش میکروسکوپ الکترونی عبوری و آنالیز عنصری مورد شناسایی قرار گرفت. سپس، الکتروکود خمیر کربن اصلاح شده با نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی با درصد وزنی بهینه (۱۰٪ وزنی-وزنی) تهیه و سنسور طراحی شده برای بررسی الکتروشیمیایی رفتار اپی رویسین بکار گرفته شد. نتایج نشان می دهد که بیشترین حساسیت در شرایط خنثی حاصل شده است. سنسور طراحی شده بخوبی اپی رویسین را در محدوده غلظتی ۰.۰۱-۳۲۰ میکرومولار شناسایی و حد تشخیص ۸ نانومولار برای اندازه گیری آن در سطح سنسور گزارش نموده است. سنسور اصلاح شده توانایی کاتالیزوری مناسبی در افزایش جریان اکسیداسیون و همچنین کاهش ولتاژ دارو را نشان داده است. در نهایت، سنسور پیشنهادی برای اندازه گیری اپی رویسین در نمونه های آمپول و سرم قندی استفاده شده و نتایج درصد بازیابی ۹۷/۴-۱۰۲/۸٪ نشان داده است که برای یک سنسور جدید قابل قبول می باشد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳	
کلمات کلیدی:	
اپی رویسین، الکتروکود اصلاح شده، نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی، سنسور.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.36848.2343>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

از سرطان به عنوان یکی از مهمترین موضوعات مورد بحث در جهان یاد شده و بخشی بزرگی از مرگ میر جامعه بشری بخاطر این پدیده می باشد [۱]. محققین متعددی در دنیا بروی تشخیص و درمان سرطان فعالیت کرده و روش های تشخیصی زودهنگام و درمان آن با عوارض جانبی کم را مورد بررسی قرار داده اند. در این میان، سرطان سینه به عنوان یکی از شایع ترین سرطانها، بخصوص در بین زنان شناخته شده است، که بخش اعظمی از مرگ و میر ناشی از سرطانها در جهان را رقم زده است [۲]. استفاده از شیمی درمانی و داروهای ضدسرطان به عنوان یک روش مرسوم در مسیر درمان سرطان یاد شده و بسته به میزان پیشرفت و نوع بیماری، داروهای مختلفی تجویز می شود [۱]. استفاده از دارو صحیح با کمترین عوارض جانبی از مهمترین موضوعات در شیمی درمانی است که نیاز به بررسی توسط روشهای تشخیصی دارد. اپی رویسین، دارویی از دسته آنتراسیکلینها است که برای شیمی درمانی مورد استفاده قرار گرفته و می تواند در ترکیب با سایر داروها برای درمان سرطان پستان در بیماران

که تحت عمل جراحی برداشتن تومور قرار گرفته‌اند، استفاده شود. اپی روبیسین از دسته داروهای ضد سرطان است که احتمالاً از طریق اتصال به DNA مانع ساخت اسیدهای هسته ای می شود. اپی روبیسین ممکن است عوارض ناخواسته‌ای به همراه داشته باشد که شامل موارد زیر است: عوارض قلبی مانند سمیت قلبی که با تاکی کاردی، آریتمی، درد شکمی و تغییرات ECG نمایان می‌شود [۳]. همچنین، حساسیت مفرط که ممکن است با تب، لرز، کهیر و حتی آنافیلاکسی همراه باشد به همراه اختلالات کبدی و کلیوی نیز در مواردی گزارش شده است. عوارض پوستی شامل ریزش کامل مو به صورت برگشت پذیر، پر رنگ شدن بستر ناخن و چین و چروک پوست هم به عنوان عوارض این دارو شناخته شده است [۴]. آشنایی با اپی روبیسین و موارد مصرف آن می‌تواند به درک بهتر این عوارض کمک کند. براین اساس، اندازه گیری آن در نمونه های دارویی و بیولوژیک از اهمیت ویژه ای برخوردار است. تکنیک های مختلف تجزیه ای مانند روش های کروماتوگرافی، اسپکتروسکوپی و الکتروشیمیایی برای اندازه گیری این داروی ضدسرطان گزارش شده اند [۵-۸]. در این میان توجه به روش های الکتروشیمیایی به علت مزایای چشمگیر مانند استفاده از محیط های غیرآلوده در فرایند آنالیز، سرعت آنالیز بالا، هزینه پایین در فرایند اندازه گیری و بهبود کارایی با استفاده از روش های اصلاح سازی بیش از روش های دیگر در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۹-۱۲].

الکترودهای اصلاح شده رویکردی مناسب برای افزایش گزینش پذیری و حساسیت سنسورهای الکتروشیمیایی بوده که می تواند ایجاد کیت های تشخیصی را به حالت واقعی تبدیل کند. اصلاح کننده های مختلفی جهت بهبود کارایی سنسورهای الکتروشیمیایی طراحی شده اند که از آن جمله می توان به ترکیبات بیولوژیک، کامپوزیت های آلی و معدنی و همچنین نانومواد کربنی و فلزی اشاره کرد. استفاده از نانوذرات اکسید فلزی و بخصوص نانوکامپوزیت هایی از نانولوله های کربنی و اکسید فلزی به علت هدایت الکتریکی مناسب و سطح فعال واکنش در سالهای اخیر رشد چشمگیری داشته و به حساسیت سنسورهای طراحی شده و گزینش پذیری آنها کمک شایانی کرده است [۱۳-۱۷].

نانولوله های کربنی به علت سطح ویژه بسیار بالا، رسانایی الکتریکی عالی و ساختاری با قابلیت اصلاح سازی، یکی از پرکاربردترین نانومواد در اصلاح سازی الکترودها و بخصوص الکترودهای خمیر کربن جهت طراحی و ساخت سنسورهای الکتروشیمیایی به حساب می آیند [۱۸-۲۰]. نانوکامپوزیت هایی از نانولوله های کربنی با نانوذرات اکسید نیکل می تواند یک هم افزایی جالب و باور نکردنی را به عنوان کاتالیست در سنسورهای الکتروشیمیایی ایجاد کرده که در آن، نانولوله های کربنی به عنوان مسیر رسانا برای تسهیل انتقال الکترون ترکیبات الکتروفعال عمل کرده و نانوذرات اکسید نیکل با خاصیت کاتالیزی و رفتار شبه ردوکس خود، سایت های فعال بیشتری برای واکنش الکتروشیمیایی فراهم می سازند. توزیع یکنواخت نانوکامپوزیت در ساختار خمیر کربن، منجر به افزایش مساحت سطح مؤثر سنسور، بهبود سینتیک انتقال بار، کاهش اضافه ولتاژ فرایند ردوکس و در نهایت افزایش حساسیت و حد تشخیص پایین تر در سنسور می شود [۲۱-۲۳]. در نتیجه، استفاده از نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/اکسید

نیکل در اصلاح الکتروود خمیر کربن، یک استراتژی جالب و مناسب برای توسعه سنسورهای الکتروشیمیایی سریع، پایدار و پرحساسیت در آنالیز و اندازه گیری مقادیر ناچیز ترکیبات الکتروفعال است.

با توجه به نکات گفته شده، در این کار تحقیقاتی، سنسور الکتروشیمیایی جدید با استفاده از خمیر کربن اصلاح شده با نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی به عنوان یک کاتالیست با هدایت الکتریکی بالا طراحی شده و از آن برای اندازه گیری اپی روبیسین استفاده شده است. نتایج کارایی مناسب این سنسور را در اندازه گیری اپی روبیسین در نمونه های دارویی و بیولوژیک را تایید می کند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و دستگاهها

در این کار تحقیقاتی، نیترات نیکل شش آبه، نانولوله های کربنی عامل دار (کربوگسیلیک اسید)، سدیم هیدروگساید، جهت سنتز نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی از شرکت سیگما - آلد ریچ خریداری شد. از نمکهای اسید فسفریک خریداری شده از شرکت مرک برای تهیه بافر فسفات استفاده شد. پودر گرافیت و روغن پارافین از شرکت مرک خریداری شده و برای تهیه الکتروود خمیر کربن استفاده شد. اپی روبیسین هیدروکلراید با خلوص بالای ۹۰٪ از شرکت سیگما خریداری شد. برای تهیه محلول مادر اپی روبیسین، ۰٫۰۶۴ گرم از اپی روبیسین هیدروکلراید وزن شده و در داخل یک بالن ژوژه ده میلی لیتری با استفاده از بافر pH=7.0 به حجم رسانده شد. بدین ترتیب، محلول ۰٫۰۱ مولار اپی روبیسین هیدروکلراید تهیه و به عنوان محلول مادر برای تمام آزمایشات استفاده شد.

برای ثبت سیگنال های الکتروشیمیایی، از دستگاه پتانسیو استا/گالوانواستا (Vertex-Ivium) استفاده شده است. برای تنظیم شرایط بافری از دستگاه متروم مدل (pH Meter, laboratory version ۹۱۳) استفاده شد. دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل (FESEM, Apreo 2S, ThermoScientific, USA) برای آنالیز مورفولوژی و آنالیز عنصری نانوکامپوزیت بکار گرفته شد.

۲-۲- سنتز نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی

نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی با استفاده از روش رسوب دهی مستقیم سنتز شد. مقدار یک گرم نانولوله کربنی عامل دار (کربوگسیله) به محلول آب مقطر اضافه شده (۵۰ میلی لیتر) و در داخل شیکر برای نیم ساعت بهم زده شد. سپس محلول نیترات نیکل شش آبه نیم مولار به حجم ۵۰ میلی به آن اضافه شده و هم زدن به مدت نیم ساعت ادامه پیدا کرد. در ادامه، ۱۰۰ میلی لیتر محلول هیدروگسید سدیم یک مولار قطره قطره به آن اضافه شده و عمل هم زدن ادامه پیدا کرد. پس از اتمام مراحل رسوب دهی، مخلوط به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق بهم زده، شسته شد و به طور مداوم با استفاده از آب مقطر فیلتر

شد. در ادامه، نمونه در دمای 120 سانتی گراد خشک شد. در نهایت نمونه های جامد در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت کلسینه شد.

۲-۳- تهیه سنسور

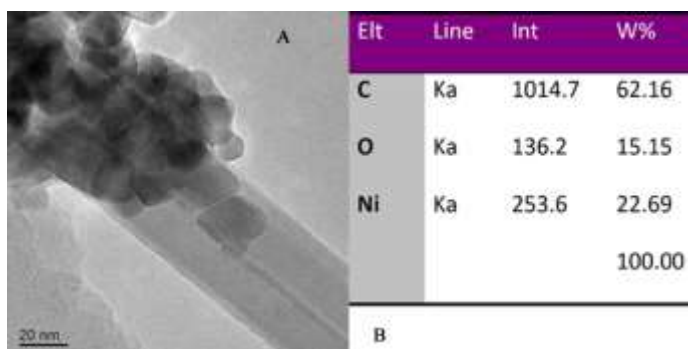
بدین منظور ده میلی گرم نانوکامپوزیت اکسیدنیکل/نانولوله کربنی با ۹۰ میلی گرم پودر گرافیت در داخل هاون مخلوط و ۵ میلی لیتر دی اتیل اتر به عنوان حلال به آن اضافه شد. پس از پراندن حلال، روغن پارافین بصورت قطره ای (دوازده قطره) به آن اضافه شد و سپس بصورت دستی مخلوط شد. عمل ساییدن به مدت یکساعت ادامه پیدا کرد و خمیر تهیه شده به انتهای لوله شیشه ای منتقل شده و اتصال الکتریکی به وسیله سیم مسی انجام شد.

۲-۴- تهیه نمونه حقیقی

نمونه های آمپول و سرم قندی از داروخانه در استان مازندران تهیه و به عنوان نمونه حقیقی استفاده شد. نمونه تهیه شده، پس از سانتیفریوژ به مدت ۱۰ دقیقه با دور (۳۰۰۰ دور بر دقیقه) صاف شده و به عنوان نمونه حقیقی استفاده شد. روش افزایش استاندارد به عنوان روش مناسب برای اندازه گیری اپی روبیسین استفاده شد.

۳- بحث و نتایج

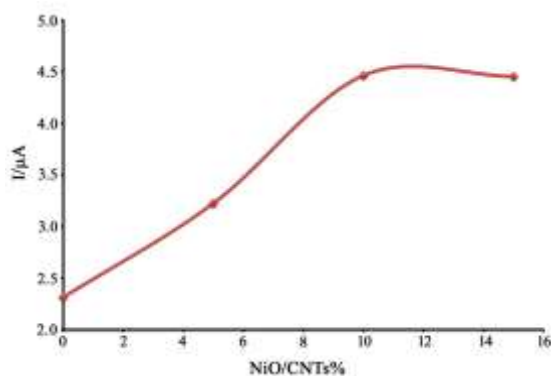
پیش از بررسی های الکتروشیمیایی، مورفولوژی نانوکامپوزیت اکسیدنیکل/نانولوله کربنی با استفاده از روش میکروسکوپ الکترونی عبوری و آنالیز عنصری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل در شکل ۱A نشان داده شده است. تفسیر نتایج بخوبی نشان می دهد که نانوذرات اکسید نیکل با اندازه حدود ۱۰ نانومتر برو سطح نانولوله های کربنی قرار گرفته است. نتایج آنالیز عنصری نشان می دهد که عناصر نیکل، اکسیژن و کربن در ساختار نانوکامپوزیت اکسیدنیکل/نانولوله کربنی موجود بوده که تاییدی بر خلوص سنتز است (شکل 1B).



شکل ۱. (A) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری و (شکل B) تصویر آنالیز عنصری نانوکامپوزیت اکسیدنیکل/نانولوله کربنی

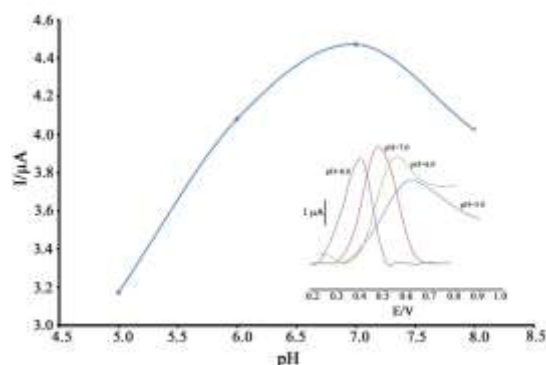
در مرحله اول، درصد کاتالیست بکار رفته در ساخت سنسور بهینه شد. بدین منظور الکترودهای اصلاح شده خمیرکربن با درصد های ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ از نانوکامپوزیت تهیه شده و سیگنال الکتروشیمیایی اپی روبیسین در سطح هر سنسور ثبت و تغییرات

جریان برحسب درصد وزنی نانوکامپوزیت به پودر گرافیت در شکل ۲ نمایش داده شد. همانطور که مشاهده شده است، جریان الکتروشیمیایی با افزایش درصد نانوکامپوزیت به ده درصد افزایش یافته است، که نشان از تاثیر هدایت الکتریکی کاتالیست در بهبود فرایند ردوگس آنالیت در سطح سنسور است. در ادامه و پس از افزایش به ۱۵ درصد از نانوکامپوزیت، سیگنال ثابت شده که این موضوع نشان از اشباع شدن سطح سنسور و رسیدن به ماکزیمم رسانندگی الکتریکی می باشد.

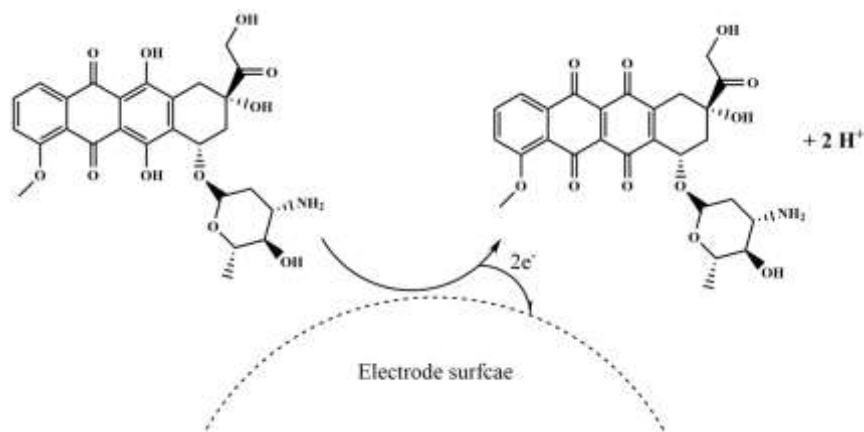


شکل ۲. منحنی تغییرات جریان آندی اپی رویسین در سطح الکتروود خمیر کربن اصلاح شده با درصد های مختلف از نانوکامپوزیت

پس از بهینه سازی ساخت سنسور، شرایط pH برای اندازه گیری اپی رویسین مورد بهینه سازی قرار گرفت. بدین منظور، سیگنال اپی رویسین در سطح سنسور بهینه شده در شرایطه pH در رنج ۵ تا ۸ ثبت و تغییرات جریان برحسب pH و تغییرات پتانسیل بر حسب pH مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج در شکل ۳ به تصویر کشیده شد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده شده است، با افزایش pH به سمت مقادیر خنثی، جریان اکسیداسیون اپی رویسین افزایش یافته و پس از آن این مقدار روندی کاهشی را نشان داده است. براین اساس، ماکزیمم حساسیت در شرایط خنثی بدست آمده و این شرایط به عنوان شرایط بهینه برای اندازه گیری انتخاب شد. در ادامه، تغییرات پتانسیل بر حسب pH یک روند نزولی با شیب -0.0692 میلی ولت بر pH را نشان داده است، که این مقدار نزدیکی جالبی با شیب نرنستی برای حضور مقدار یکسانی از الکترون و پروتون را فرایند ردوگس نشان می دهد. براین اساس، مکانیزمی در شکل ۴ ارائه داده شده است که برای فرایند ردوگس اپی رویسین متصور است.

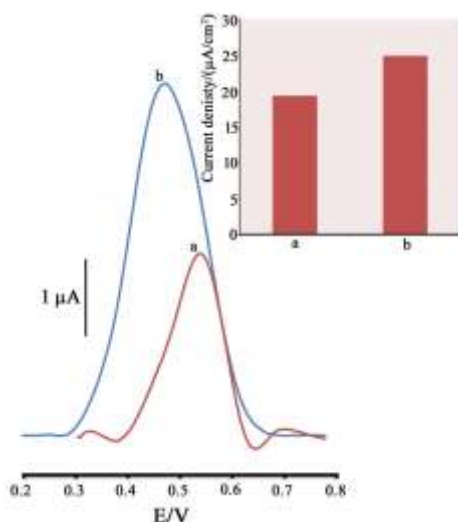


شکل ۳. منحنی تغییرات جریان آندی بر حسب تغییرات pH برای اکسیداسیون اپی رویسین در سطح سنسور اصلاح شده. شکل داخلی ولتاموگرام های پالس تفاضلی مربوطه در pH های مختلف.



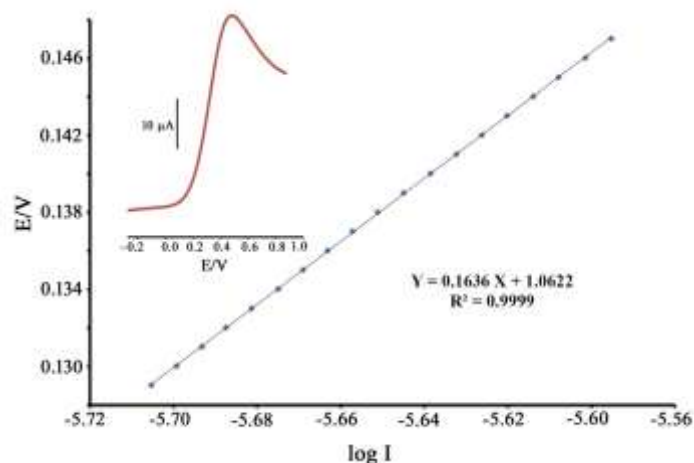
شکل ۴. مکانیزم ردوگس اپی روبیسین در سطح الکتروود در محیط های آبی

سطح فعال الکتروود خمیر کربن و الکتروود خمیر کربن اصلاح شده با نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی با استفاده از محلول ۱ میلی مولار فرو/فروسیانید و رابطه راندلس-سوچیک محاسبه شد. مقادیر ۰,۱۲ سانتی متر مربع و ۰,۱۸ سانتی متر مربع به عنوان سطح فعال برای این دو الکتروود به ترتیب بدست آمده است. سیگنال اپی روبیسین در سطح الکتروود خمیر کربن ساده جریانی معادل ۲,۳۱ میکروآمپر و پتانسیل معادل ۵۳۰ میلی ولت را نشان می دهد. در حالیکه، این مقادیر در سطح الکتروود اصلاح شده با نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی به ترتیب ۴,۴۶ میکروآمپر و ۴۶۵ میلی ولت را نشان داده است. این افزایش در جریان و کاهش اضافه ولتاژ به خوبی نقش کاتالیستی نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی را در اصلاح سازی و طراحی یک سنسور الکتروشیمیایی تایید می کند (شکل ۵). شکل ۵ (داخلی) منحنی دانسیته جریان برای دو الکتروود اصلاح نشده و اصلاح شده را نشان می دهد. همانطور که بخوبی نمایش داده شده است، حضور کاتالیست باعث افزایش هدایت الکتریکی سطح الکتروود گردیده است.



شکل ۵. ولتاموگرام پالس تفاضلی اپی روبیسین در سطح الکتروود خمیر کربن ساده (a) و الکتروود خمیر کربن اصلاح شده (b). شکل داخلی منحنی دانسیته جریان مربوطه

ضریب انتقال الکترون (α) برای اپی روبیسین در سطح الکتروود اصلاح شده با نانوکامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی با استفاده از داده های بدست آمده از قسمت بالارونده منحنی ولتاموگرام روبش خطی و معادل تافل بدست آمده است. با استفاده از شیب منحنی ارائه شده در شکل ۶ و معادله تافل، میزان ضریب انتقال الکترون ۰,۸ محاسبه شد که این موضوع نشان می دهد فرایند انتقال الکترون با محدودیت سینتیکی مواجه است.

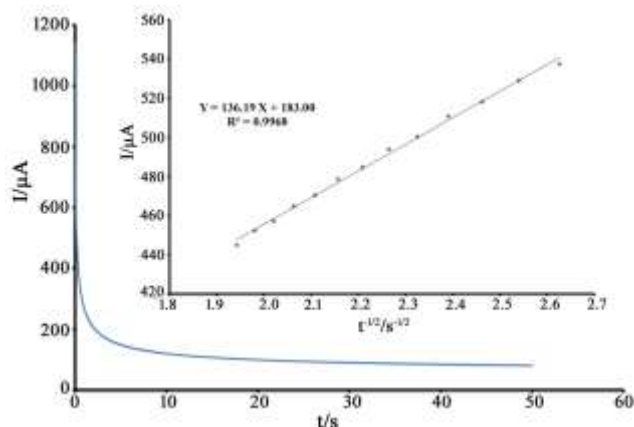


شکل ۶ منحنی تافل مربوط به اکسیداسیون ۵۰۰ میکرومولار اپی روبیسین در سطح سنسور طراحی شده با سرعت روبش ۳۰ میلی ولت برثانیه

در ادامه، ضریب نفوذ اپی روبیسین در محلول برای انجام واکنش ردوکس در سطح سنسور طراحی شده، با استفاده از روش کروئوآمپرومتری محاسبه شد. بدین منظور، کروئوآمپروگرام الکتروود اصلاح شده در محلول حاوی اپی روبیسین ثبت و با استفاده از داده های قسمت پایین رونده کروئوآمپروگرام منحنی کاترل رسم شد (شکل ۷). با استفاده از شیب منحنی کاترل و معادله کاترل (معادله ۱)، مقدار ضریب نفوذ $D = 8/1 \times 10^{-6}$ سانتی متر مربع بر ثانیه محاسبه شد

$$I = \frac{nFACD^{1/2}}{t^{1/2}\pi^{1/2}} \quad \text{رابطه ۱}$$

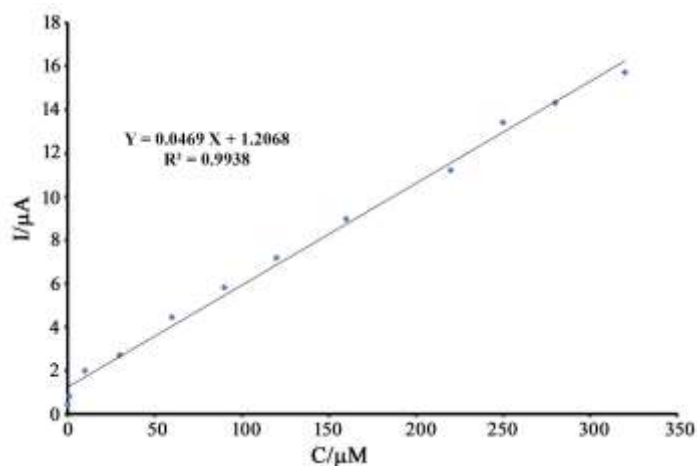
با استفاده از روش ولتامتر پالس تفاضلی، بررسی های تجزیه ای برای تعیین گستره خطی و حدتشخیص انجام شد. بدین منظور ولتاموگرام پالس تفاضلی اپی روبیسین در محدوده غلظتی ۰,۰۱ - ۳۲۰ میکرومولار ثبت شد. نتایج یک گستره خطی در محدوده ۰,۰۱ - ۳۲۰ میکرومولار با حساسیت ۰,۰۴۶۹ میکروآمپر بر میکرومولار نشان داده است (شکل ۸). حدتشخیص ۸ نانومولار برای اندازه گیری اپی روبیسین با استفاده از سنسور پیشنهادی بدست آمده است. این مقدار از حد تشخیص و گستره خطی در مقایسه با سنسورهای قبلی قابل ملاحظه و در برخی موارد بهتر می باشد (جدول ۱). مهمترین ویژگی سنسور پیشنهادی، سنتز راحت نانوکامپوزیت و طراحی ساده آن می باشد.



شکل ۷. کروماتوگرام الکتروکود اصلاح شده در حضور ۱ میلی مولار اپی روبیسین. شکل داخلی) منحنی کاترل استخراج شده برای اپی روبیسین

جدول ۱. مقایسه نتایج تجزیه ای سنسورهای الکتروشیمیایی گزارش شده برای اندازه گیری اپی روبیسین

الکتروکود	اصلاح کننده	گسترده خطی	حد تشخیص	رفرنس
الکتروکود چاپی	نانو کامپوزیت طلا/نانولوله کربنی/اکسید روی	۰.۰۰۵ – ۱۰۰	۰.۰۰۲۵	[۲۴]
الکتروکود طلا	نانو کربن و اپتامر	0.001 – 0.075	0.003	[25]
الکتروکود کربن شیشه ای	نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/انقره	0.003 – 0.25	0.001	[26]
خمیر کربن	نانو کامپوزیت اکسید نیکل/نانولوله کربنی	0.01 – 320	0.008	کار حاضر



شکل ۸. منحنی گسترده خطی برای اکسیداسیون اپی روبیسین در گسترده خطی ۰.۱ تا ۳۲۰ میکرومولار در سطح سنسور طراحی شده

در انتها، توانایی سنسور برای اندازه گیری داروی ضدسرطان اپی روبیسین در نمونه های حقیقی با استفاده از روش افزایش استاندارد مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه های آمپول و سرم قندی تهیه و میزان اپی روبیسین موجود یا اضافه شده مورد سنجش قرار گرفت. نتایج در جدول ۲ گزارش شده است. نتایج گزارش شده، میزان بازیابی های قابل قبولی را ارائه داده است که بخوبی نشان از توانایی بالای سنسور در اندازه گیری داروی اپی روبیسین در نمونه های حقیقی می باشد.

جدول ۲. نتایج حاصل از اندازه گیری اپی روبیسین در نمونه های آمپول و سرم قندی

نمونه	مقدار اولیه بر حسب میکرومولار	مقدار موجود بر حسب میکرومولار	مقدار تعیین شده بر حسب میکرومولار	درصد بازیابی %
آمپول	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۶±۰,۰۹	103
---	۱۰,۰۰	۱۲,۰۰	۱۱,۶۹±۰,۷۶	97.4
سرم قندی	---	--	کمتر از حدتشخیص	
	۲۰,۰۰	۲۰,۰۰	۲۰,۵۶±۰,۹۶	102.8

۴- بحث و نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی، یک سنتز تک مرحله ای ساده برای سنتز نانوکامپوزیت اکسیدنیکل/نانولوله کربنی به عنوان یک کاتالیست پیشنهاد شده و از کاتالیست سنتز شده برای اصلاح سازی الکتروود خمیر کربن استفاده شد. الکتروود خمیر کربن اصلاح شده با نانوکامپوزیت اکسیدنیکل/نانولوله کربنی به عنوان یک مدل برای اندازه گیری داروی ضدسرطان اپی روبیسین بکار گرفته شد. سنسور طراحی شده در محدوده خطی ۰,۰۱ تا ۳۲۰ میکرومولار قابلیت اندازه گیری سریع اپی روبیسین را نشان داده و توانسته است حدتشخیص ۳۰ نانومولار را برای این داروی ضدسرطان ایجاد کند. توانایی سنسور در اندازه گیری اپی روبیسین در نمونه های حقیقی به اثبات رسیده و درصد بازیابی قابل قبولی را نشان داده است.

۵- تقدیر و تشکر

نویسنده از حمایت های گروه شیمی تجزیه و دانشکده شیمی دانشگاه دامغان تشکر و قدردانی می کند.

۶- فهرست منابع و مآخذ

- [1] Nygren, P. (2001). What is cancer chemotherapy? *Acta Oncologica*, 40(2-3), 166-174
- [2] Harbeck, N., Penault-Llorca, F., Cortes, J., Gnant, M., Houssami, N., Poortmans, P., Ruddy, K., Tsang, J., & Cardoso, F. (2019). Breast cancer. *Nature reviews Disease primers*, 5(1), 66.
- [3] Cersosimo, R. J., & Hong, W. K. (1986). Epirubicin: a review of the pharmacology, clinical activity, and adverse effects of an adriamycin analogue. *Journal of Clinical Oncology*, 4(3), 425-439
- [4] Robert, J. (1993). Epirubicin: clinical pharmacology and dose-effect relationship. *Drugs*, 45(Suppl 2), 20-30
- [5] Dodde, W. I., Maring, J. G., Hendriks, G., Wachters, F. M., Groen, H. J., de Vries, E. G., & Uges, D. R. (2003). Determination of epirubicin and its metabolite epirubicinol in saliva and plasma by HPLC. *Therapeutic drug monitoring*, 25(4), 433-440
- [6] Wall, R., McMahon, G., Crown, J., Clynes, M., & O'Connor, R. (2007). Rapid and sensitive liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the quantitation of epirubicin and identification of metabolites in biological samples. *Talanta*, 72(1), 145-154.
- [7] Sottani, C., Leoni, E., Porro, B., Montagna, B., Amatu, A., Sottotetti, F., Quaretti, P., Poggi, G., & Minoia, C. (2009). Validation of an LC-MS/MS method for the determination of epirubicin in human

- serum of patients undergoing Drug Eluting Microsphere-Transarterial Chemoembolization (DEM-TACE). *Journal of Chromatography B*, 877(29), 3543-3548.
- [8] Shams, A., & Yari, A. (2019). A new sensor consisting of Ag-MWCNT nanocomposite as the sensing element for electrochemical determination of Epirubicin. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 286, 131-138.
- [9] Alizadeh, M., Asrami, P. N., Altuner, E. E., Gulbagca, F., Tiri, R. N. E., Aygun, A., Kaynak, İ., Sen, F., & Cheraghi, S. (2022). An ultra-sensitive rifampicin electrochemical sensor based on Fe₃O₄ nanoparticles anchored Multiwalled Carbon nanotube modified glassy carbon electrode. *Chemosphere*, 309, 136566.
- [10] Hojjati-Najafabadi, A., Salmanpour, S., Sen, F., Asrami, P. N., Mahdavian, M., & Khalilzadeh, M. A. (2022). A tramadol drug electrochemical sensor amplified by biosynthesized Au nanoparticle using mentha aquatic extract and ionic liquid. *Topics in Catalysis*, 65(5), 587-594.
- [11] Moradi Hasan-Abad, A., Esmaili, M. A., Akbari, M., Sorouri, A. M., Hosseinzadeh, L., & Sobhaninasab, A. (2022). Voltammetric Electrochemical Sensor for Rapid and Convenient Morphine Detection: A Review. *Analytical and Bioanalytical Electrochemistry*, 14(12), 1152-1169.
- [12] Wang, X., Luo, C., Li, L., & Duan, H. (2015). An ultrasensitive molecularly imprinted electrochemical sensor based on graphene oxide/carboxylated multiwalled carbon nanotube/ionic liquid/gold nanoparticle composites for vanillin analysis. *RSC Advances*, 5(113), 92932-92939.
- [13] Ensafi, A. A., Karimi-Maleh, H., & Mallakpour, S. (2012). Simultaneous determination of ascorbic acid, acetaminophen, and tryptophan by square wave voltammetry using N-(3, 4-Dihydroxyphenethyl)-3, 5-Dinitrobenzamide-modified carbon nanotubes paste electrode. *Electroanalysis*, 24(3), 666-675.
- [14] Jalali Sarvestani, M. R., Madrakian, T., & Afkhami, A. (2023). Simultaneous electrochemical determination of Pb²⁺ and Cd²⁺ ions in food samples by a silver nanoparticle/COF composite modified glassy carbon electrode. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 3505-3514.
- [15] Karimi-Maleh, H., Sanati, A. L., Gupta, V. K., Yoosefian, M., Asif, M., & Bahari, A. (2014). A voltammetric biosensor based on ionic liquid/NiO nanoparticle modified carbon paste electrode for the determination of nicotinamide adenine dinucleotide (NADH). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 204, 647-654.
- [16] Mohammadi, S. Z., Beitollahi, H., & Hassanzadeh, M. (2018). Voltammetric determination of tryptophan using a carbon paste electrode modified with magnesium core shell nanocomposite and ionic liquids. *Analytical and Bioanalytical Chemistry Research*, 5(1), 55-65.
- [17] Sipa, K., Brycht, M., Leniart, A., Urbaniak, P., Nosal-Wiercińska, A., Pałecz, B., & Skrzypek, S. (2018). β-Cyclodextrins incorporated multi-walled carbon nanotubes modified electrode for the voltammetric determination of the pesticide dichlorophen. *Talanta*, 176, 625-634.

- [18] Shadabfar, M., Ehsani, M., Khonakdar, H.A., & Abdouss, M, (2024) Enhanced the properties of carbon-paste nanocomposite by carboxylation of multi-walled carbon nanotubes. *Polymers Composites*, 45, 475-488.
- [19] Odaci, D., Telefoncu, A., & Timur, S., (2008) Pyranose oxidase biosensor based on carbon nanotube (CNT)-modified carbon paste electrodes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 132 (1), 159-165.
- [20] Yaghoubian, H., Karimi-Maleh, H., Khalilzadeh, M.A., & Karimi, F. (2009) Electrocatalytic Oxidation of Levodopa at a Ferrocene Modified Carbon Nanotube Paste Electrode. *International Journal of Electrochemical Science*, 4 (7), 993-1003.
- [21] Baghayeri, M., Sedrpoushan, A., Mohammadi, A., & Heidari, M. (2017) A non-enzymatic glucose sensor based on NiO nanoparticles/functionalized SBA 15/MWCNT-modified carbon paste electrode. *Ionics*, 23, 1553-1562.
- [22] Karimi-Maleh, H., Biparva, P., & Hatami, M. (2013) A novel modified carbon paste electrode based on NiO/CNTs nanocomposite and (9, 10-dihydro-9, 10-ethanoanthracene-11, 12-dicarboximido)-4-ethylbenzene-1, 2-diol as a mediator for simultaneous determination of cysteamine, nicotinamide adenine dinucleotide and folic acid. *Biosensors and Bioelectronics*, 48, 270-275.
- [23] Sanati, A.L., Karimi-Maleh, H., Badiei, A., Biparva, P., & Ensafi, A.A. (2014) A voltammetric sensor based on NiO/CNTs ionic liquid carbon paste electrode for determination of morphine in the presence of diclofenac. *Materials Science and Engineering: C*, 35, 379-385
- [24] Wang, Y., Xie, J., Tao, L., Tian, H., Wang, S., & Ding, H. (2014) Simultaneous electrochemical determination of epirubicin and methotrexate in human blood using a disposable electrode modified with nano-Au/MWNTs-ZnO composites. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 204, 360-367.
- [25] Sohoulı, E., Ghalkhani, M., Zargar, T., & Ahmadi, F (2022) Preparation of a Highly Sensitive Electrochemical Aptasensor for Measuring Epirubicin Based on a Gold Electrode Boosted with Carbon Nano-Onions and MB. *Biosensors*, 12(12), 1139.
- [26] Shams, A., & Yari, A. (2019) A new sensor consisting of Ag-MWCNT nanocomposite as the sensing element for electrochemical determination of Epirubicin. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 286, 131-138.