

# ساخت زیست حسگر مقاومتی باکتری ای کولای بر اساس نانومیله ها و نانوذرات اکسید روی

لیلا مسیح زاده<sup>۱</sup> زهیر کردرستمی<sup>۲</sup> دکتر بهمن پورعباس<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق-الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

[kordrostami@sutech.ac.ir](mailto:kordrostami@sutech.ac.ir)

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق-الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

۳- استادیار- مرکز تحقیقات میکروب شناسی بالینی استاد البرزی- دانشگاه علوم پزشکی شیراز- شیراز- ایران

**چکیده:** در این مقاله با استفاده از نانومیله ها و نانوذرات اکسید روی، زیست حسگرهایی جهت تشخیص غلظت های مختلف باکتری ای کولای موجود در آب ساخته شده است. نوآوری این مقاله در طراحی و ساخت زیست حسگرهای باکتری ای کولای از نوع مقاومتی می باشد. برای ساخت این حسگرها، الکترودها به صورت مدار چاپی (PCB) به شکل دندانانه شانه ای طراحی و ساخته شده اند. نانومیله های اکسید روی به روش هیدروترمال بر روی الکترودها رشد داده شدند. همچنین از روش لایه نشانی قطره ای جهت قراردادن نانوذرات اکسید روی بر روی الکترودهای مسی استفاده گردیده است. توسط زیست حسگر، غلظت های متفاوتی از باکتری ای کولای موجود در آب اندازه گیری شده است. هنگامی که زیست حسگر در معرض باکتری قرار می گیرد به دلیل واکنشی که با اکسید روی رخ می دهد مقاومت بین الکترودها تغییر می یابد. خروجی زیست حسگر ولتاژ تقویت شده ای است که تابعی از تغییر مقاومت بین الکترودهای دندانانه شانه ای است. غلظت باکتری توسط زیست حسگر در معرض نور فرابنفش اندازه گیری شده است و اثر غلظت نانوذرات اکسید روی و ابعاد PCB بر روی ولتاژ و حساسیت زیست حسگر بررسی شده است. نتایج اندازه گیری توسط زیست- حسگرهای پیشنهادی با یکدیگر مقایسه شده و بهترین زیست حسگر با بالاترین حساسیت معرفی گردیده است.

**واژه های کلیدی:** زیست حسگر، اکسید روی، باکتری ای کولای، لایه نشانی قطره ای

**نوع مقاله:** پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۵/۱۹

نام نویسنده ی مسئول: دکتر زهیر کردرستمی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده ی مهندسی برق - الکترونیک

## ۱- مقدمه

گرافین [۱۶]، الکتروشیمیایی [۱۷] و MEMS [۱۸] ساخته شده است. این مقاله به ساخت زیست‌حسگرهایی بر مبنای نانوساختارهای اکسید روی جهت تشخیص باکتری ای کولای موجود در آب پرداخته است. ایده جدید به کار رفته در این کار، طراحی حسگر مقاومتی است که با تغییر غلظت باکتری مقاومت آن و در نتیجه ولتاژ خروجی آن تغییر می‌نماید. به این منظور برای ایجاد نانوساختارهای اکسید روی حساس به باکتری از دو روش هیدروترمال و لایه نشانی قطره‌ای استفاده گردیده و تاثیر ابعاد PCB و غلظت نانوذرات اکسید روی مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- روش ساخت زیست حسگر باکتری

در این مقاله دو نمونه الکتروود ساخته شده و دو نانوساختار اکسید روی (نانومیله و نانوذره) برای تشخیص باکتری مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲-۱- آماده‌سازی الکتروودها

برای ساخت این زیست‌حسگر ابتدا الکتروودهای مسی به صورت دندان‌شانه‌ای بر روی برد مدار چاپی (PCB) طراحی شده است. در این مقاله از دو نمونه الکتروود با ابعاد متفاوت استفاده شده است. مساحت PCBهای مورد استفاده  $18/25 \times 30 \text{ mm}^2$  و  $12 \times 30 \text{ mm}^2$  می‌باشد. پهنای الکتروودها و فاصله بین آن‌ها در PCB با مساحت  $18/25 \times 30$  میلی‌متر مربع برابر با ۲۰۰ میکرومتر و در PCB با مساحت  $12 \times 30$  میلی‌متر مربع برابر با ۱۰۰ میکرومتر می‌باشد.

جهت آماده‌سازی الکتروودها در ابتدا PCBها با استفاده از سمباده و سپس نمد آغشته به نانوذرات آلومینا صیقل داده شده‌اند. سپس PCBها در دستگاه التراسونیک با استفاده از استون، اتانول و در نهایت با آب DI هر کدام برای مدت ۵ دقیقه شست و شو داده شده‌اند. در ادامه برای ساخت زیست‌حسگر از دو روش رشد هیدروترمال و لایه نشانی قطره‌ای استفاده شده است.

## ۲-۲- روش هیدروترمال برای رشد نانومیله‌ها

در ابتدا برای ایجاد لایه بذر (seed layer)، ۲۰ میلی مولار زینک استات دی هیدرات ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) به ۱۰ میلی لیتر آب مقطر و همچنین ۶۰ میلی مولار سدیم هیدروکسید (NaOH) به ۱۰ میلی مولار آب مقطر اضافه گردید. سپس محلول زینک استات دی هیدرات در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد روی هیتر قرار گرفت تا هم بخورد. در ادامه محلول سدیم هیدروکسید آرام آرام به آن افزوده گردیده است. پس از گذشت مدت زمان یک ساعت محلول بذر قابل استفاده می‌باشد.

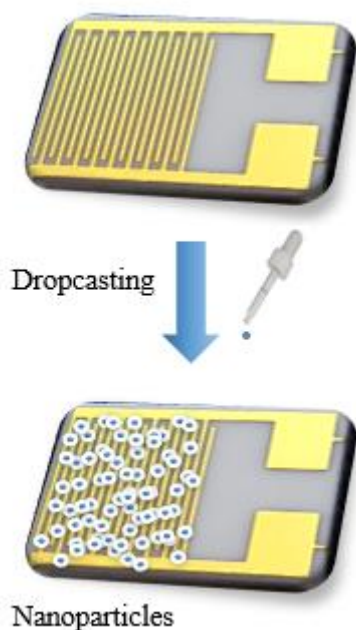
به منظور لایه نشانی لایه بذر، PCBها در دستگاه لایه‌نشانی دورانی (Spin Coater) قرار گرفته و محلول بذر به صورت قطره‌ای روی آن‌ها چکیده می‌شود. تعداد قطره‌هایی که روی PCB چکیده می‌شود

بدن انسان‌ها به آبی نیاز دارد که فاقد ناخالصی‌هایی مانند باکتری، عوامل بیماری‌زا، آلاینده‌های شیمیایی و آلودگی‌های صنعتی باشد. ای کولای (E. coli bacteria) یک نوع باکتری می‌باشد که از طریق ورود فضولات به آب‌ها، منجر به آلودگی آب می‌شود. این باکتری در ارزیابی کیفیت باکتریولوژیک آب آشامیدنی، به عنوان اصلی‌ترین شاخص آلودگی میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نباید در آب تصفیه شده وجود داشته باشد و حضور آن آب را غیرقابل شرب و نیازمند تصفیه و گندزدایی بیشتر می‌نماید [۱]. امروزه دستگاه‌هایی برای تشخیص حضور باکتری در بدن وجود دارد. اما استفاده از این دستگاه‌ها به زمان زیادی احتیاج دارد. همچنین این ابزارها پیچیده بوده و هزینه زیادی نیاز دارد. امروزه با استفاده از نانوساختارها می‌توان حسگرهایی جهت تشخیص باکتری ساخت تا هم در زمان صرفه جویی شود و هم هزینه زیادی صرف نشود. در میان نانوذرات فلز و اکسید فلز، اکسید روی یکی از مهمترین نانوذرات اکسید فلزی است [۲]. دلیل محبوبیت اکسید روی مواردی مانند هدایت حرارتی زیاد، چسبندگی خوب، قدرت پوشش عالی، داشتن ثابت دی الکتریک متوسط، ضریب شکست بالا، شکاف باند مستقیم و بزرگ ( $3/3$  الکترون ولت) [۲، ۳]، رسانایی نوع n [۴]، پایداری فیزیکی و شیمیایی بالا [۵]، سنتر ارزان قیمت [۶]، غیر سمی بودن [۲، ۶]، انرژی باند برانگیختگی آزاد بالا (۶۰ میلی الکترون ولت) و نسبت سطح به حجم بالا می‌باشد [۴، ۷]. از نانوساختارهای اکسید روی استفاده‌های زیادی می‌شود که از جمله آنها می‌توان حسگر الکتروشیمیایی برای تشخیص باکتری [۸]، حسگرهای گازی و رطوبت [۹]، حسگر گاز ازن [۱۰]، قطعاتی مانند گسیلنده‌های نوری فرابنفش، مبدل‌های پیزوالکتریک، پنجره‌های هوشمند، سلول‌های خورشیدی و استفاده در صنعت چاپ و صنایع رنگرزی [۱۱] را نام برد. اکسید روی به صورت نانوساختارهای متفاوتی از جمله نانوذره، نانولوله، نانومیله، نانوسیم و نانوفیبر قابل تولید است. نانوساختارهای اکسید روی در کاربردهای حسگری از خود حساسیت زیادی را حتی در دمای اتاق نشان داده‌اند و در ساخت حسگرهای مقاومتی مشابه چند اکسید دیگر مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۱۲، ۱۳]. حساسیت اکسید روی ناشی از موقعیت‌های خالی مربوط به اکسیژن موجود در سطح آن است. اکسید روی یکی از اعضای مهم خانواده نیم رسانای IV-II است که از لحاظ یونی شدن در مرز بین نیم‌رسانای کووالانسی و یونی قرار گرفته است [۱۱]. همچنین روش‌های مختلفی برای سنتز نانوساختارهای اکسید روی وجود دارد که از جمله این روش‌ها می‌توان به نشست بخار شیمیایی، رویکرد شیمیایی کلونیدی، سل-ژل، گرمایی (هیدروترمال)، سایش لیزری و غیره اشاره کرد. در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای ساخت حسگر باکتری‌ای کولای انجام گردیده است و حسگرهایی با مکانیزم اندازه‌گیری اپتوالکترونیکی [۱۴]، تداخل سنجی [۱۵]، تغییر در طیف رامان

در پایان این مراحل نانومیله‌های اکسید روی بر روی سطح PCB رشد می‌یابند. شکل ۱ روند رشد نانومیله‌های اکسید روی بر روی PCB به روش هیدروترمال را نشان می‌دهد. تجربه نشان می‌دهد این روش از تکرارپذیری مناسبی برخوردار می‌باشد و به این موضوع در سایر مقالات نیز اشاره گردیده است [۱۹].

### ۲-۳- روش لایه‌نشانی قطره‌ای

با استفاده از این روش نانوذرات اکسید روی بر روی الکترودهای مسی قرار گرفته‌اند. نانوذرات اکسید روی از شرکت فناوران نانوستار سپاهان تهیه شده است و ابعاد آن‌ها در حدود ۲۰ نانومتر می‌باشد. روش لایه‌نشانی قطره‌ای با ریختن یک محلول روی یک سطح صاف و تبخیر حلال، یک لایه نازک تشکیل می‌شود. در این مقاله ۵ میلی‌لیتر محلول حاوی نانوذرات اکسید روی با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر جهت لایه‌نشانی قطره‌ای، تهیه شده است. برای این منظور ابتدا ۵۰ میلی‌گرم از نانوذرات اکسید روی در ۵ میلی‌لیتر اتانول به عنوان حلال حل می‌گردد. برای این که محلول یک دست و همگنی به دست آید محلول مورد نظر در دستگاه التراسونیک قرار گرفته و روی بشر حاوی آن فویل آلومینیومی پوشانده می‌شود.

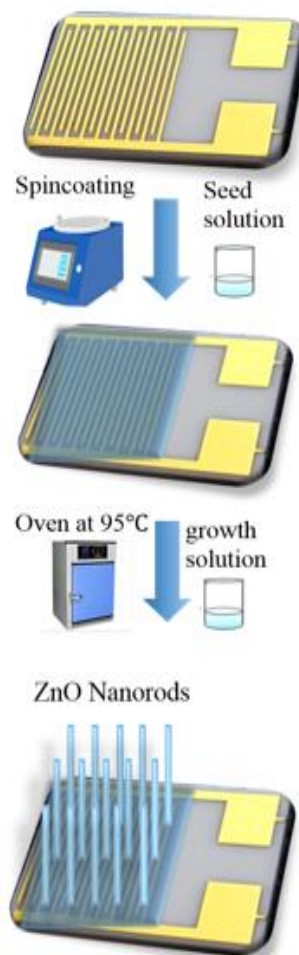


شکل (۲): روند قرار گرفتن نانوذرات اکسید روی بر روی PCB به روش لایه‌نشانی قطره‌ای

پس از گذشت مدت زمان ۲۰ دقیقه محلول پراکنده می‌شود. سپس با استفاده از سمپلر، ۵ میکرو لیتر از محلول برداشته شده و یک قطره از آن روی PCB چکانده شده است. بعد از گذشت مدت زمان ۵ تا ۱۰ دقیقه حسگر در هوای محیط خشک شده و آماده استفاده می‌شود.

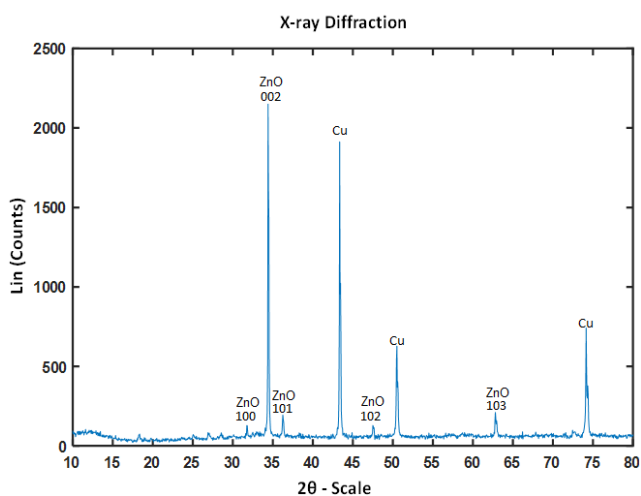
برابر با ۶ و سرعت چرخش نیز برابر با ۱۵۰۰ rpm می‌باشد. این روند ۵ مرتبه تکرار می‌گردد. در پایان الکترودهای لایه‌نشانی شده به مدت ۲ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد درون کوره قرار می‌گیرند تا خشک شوند. طی این مراحل، بر روی PCBها، یک لایه ی بذر مناسب از جنس اکسید روی لایه‌نشانی می‌گردد و آماده رشد نانومیله‌های اکسید روی می‌باشد.

برای رشد نانومیله‌های اکسید روی بر روی PCB، ۲۵ میلی مولار زینک نیترات هگزا هیدرات ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) با ۲۵ میلی مولار هگزا متیل تترا آمین (HMTA) در ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر ترکیب می‌شود و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد هم می‌خورد. سپس PCBها به صورت وارونه و مایل درون بشر حاوی محلول رشدی که آماده شده قرار گرفته و به مدت ۵ ساعت داخل کوره در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود. پس از پایان این مدت زمان حسگر با آب مقطر شسته شده و در انتها به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد درون کوره قرار می‌گیرد تا خشک شود.

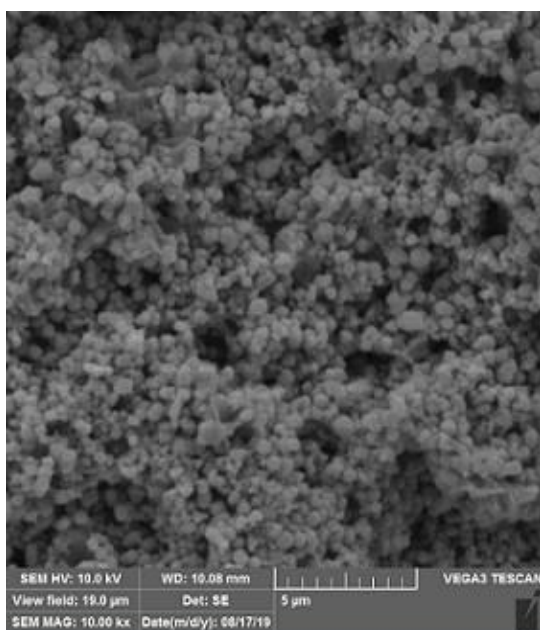


شکل (۱): روند رشد نانومیله‌های اکسید روی بر روی PCB به روش هیدروترمال

شکل ۵ نمایانگر قرار گرفتن نانوذرات به صورت یکنواخت و متراکم بر روی PCB می باشد. همانطور که در تصویر SEM مشخص است اندازه نانوذرات تشکیل شده بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر می باشد.



شکل (۴): مقایسه تصویر XRD گرفته شده از سطح PCB با تصویر XRD استاندارد ZnO و Cu



شکل (۵): تصویر SEM نانوذرات اکسید روی

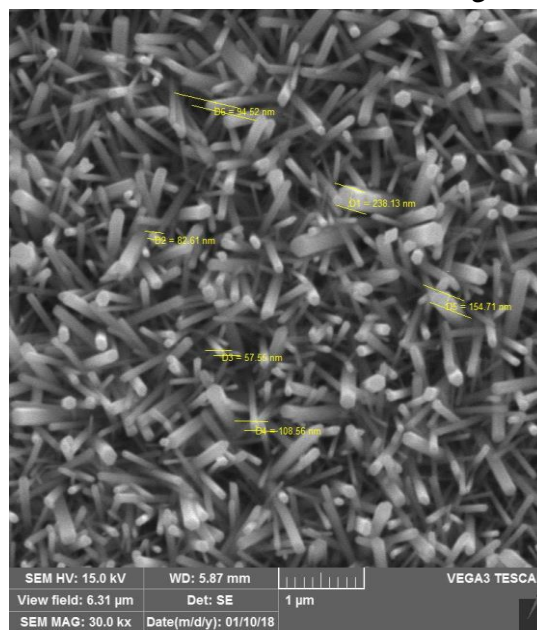
#### ۴- آماده سازی غلظت باکتری

برای آماده سازی غلظت های مختلف باکتری ای کولای از استاندارد نیم مک فارلند استفاده شده است. این استاندارد کدورتی معادل با یک سوسپانسیون باکتریایی حاوی  $10^8 \times 1/5$  ایجاد می کند. برای تهیه کدورت نیم مک فارلند، ۰/۵ میلی لیتر کلرید باریم (BaCl<sub>2</sub>) ۰/۸۴ مولار در ۹۹/۵ میلی لیتر اسید سولفوریک (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ۰/۳۶ نرمال، مخلوط شده و با هم زدن مداوم سوسپانسیون به دست

علاوه بر این ۵ میلی لیتر محلول حاوی نانوذرات اکسید روی با غلظت ۲۰ میلی گرم بر میلی لیتر جهت لایه نشانی قطره ای نیز تهیه گردید. به این ترتیب که ۵۰ میلی گرم از نانوذرات اکسید روی در ۵ میلی لیتر اتانول حل شد. سپس روندی مشابه آن چه برای غلظت ۱۰ میلی گرم بر میلی لیتر توضیح داده شد، طی گردید. شکل ۲ روند قرار گرفتن نانوذرات اکسید روی بر روی PCB به روش لایه نشانی قطره ای را نشان می دهد.

#### ۳- مشخصه یابی نانوساختارهای ZnO

پس از رشد نانومیله های اکسید روی بر روی سطح PCB به روش هیدروترمال، تصویر SEM گرفته شده است. شکل ۳ بیانگر رشد موفقیت آمیز نانومیله های اکسید روی با تراکم مناسب بر روی PCB می باشد. تراکم نانومیله ها در شکل نشان دهنده سطح صیقلی و یکدست PCBها و همچنین یکنواخت بودن رشد نانومیله ها در روش هیدروترمال می باشد. همانطور که در تصویر SEM مشخص است میانگین قطر نانومیله های رشد یافته کمتر از ۱۰۰ نانومتر می باشد. تصویر XRD گرفته شده از سطح PCB پس از رشد هیدروترمال در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۳): تصویر SEM نانومیله های اکسید روی رشد داده شده.

پیک های XRD حاصل از آنالیز نمونه های ساخته شده برای مواد مس و اکسید روی ZnO نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است، هم برای ZnO و هم Cu، نمونه مورد آزمایش پیک های قابل قبولی داشته که نشان از رشد موفقیت آمیز نانومیله های اکسید روی بر روی الکترودهای مسی می باشد.

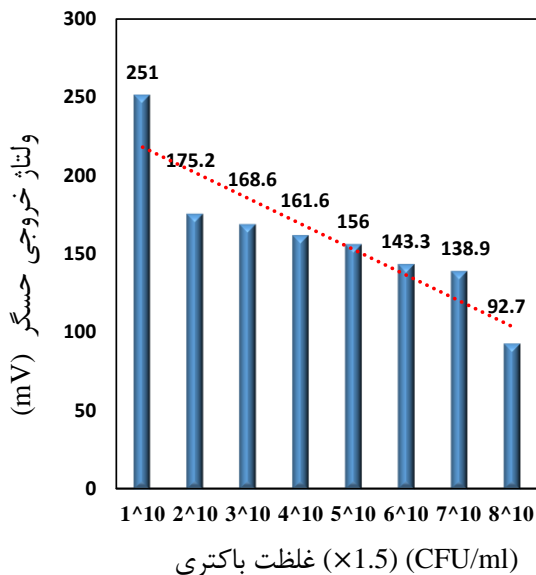
شکل ۵ تصویر SEM را نشان می دهد که پس از قرار دادن نانوذرات اکسید روی به روش لایه نشانی قطره ای بر روی PCB گرفته شده است.

حسگر از طریق سیم های لحیم شده به پدهای اتصال به مدار اندازه گیری ولتاژ متصل می گردد. مقدار مشخصی از هر غلظت باکتری ای کولای با سمپلر بر روی حسگر ریخته شده است و سپس ولتاژ خروجی حسگر توسط مولتی متر دیجیتال در حضور نور فرابنفش اندازه گیری شده است.

### ۵-۱- اندازه گیری توسط زیست حسگر باکتری مبتنی بر نانومیله ها

#### ۵-۱-۱- آزمون شماره ۱

این آزمون با استفاده از PCB های با مساحت  $12 \times 30 \text{ mm}^2$  و ضخامت الکترودهای ۱۰۰ میکرومتر انجام گرفته است. شکل ۷ ولتاژهای به دست آمده از این آزمون در غلظت های مختلف باکتری ای کولای و در حضور نور فرابنفش را نشان می دهد.



شکل (۷): آزمون ۱، تغییرات ولتاژ خروجی حسگر بر حسب غلظت باکتری ای کولای مبتنی بر نانومیله ها

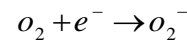
همان طور که در شکل مشخص است، با افزایش غلظت باکتری ای کولای، ولتاژ خروجی حسگر نیز کاهش یافته است. با افزایش غلظت باکتری به دلیل رسانا بودن سلول های آن، جریان افزایش یافته و مقاومت کاهش می یابد؛ در نتیجه ولتاژ خروجی حسگر نیز کاهش پیدا کرده است.

آمده است. استاندارد سولفات باریم قبل از هر بار استفاده باید با همزن مکانیکی هم زده شود تا کدورتی یکنواخت ایجاد گردد.

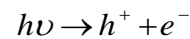
سپس با استفاده از این غلظت به دست آمده، ۸ غلظت مورد نظر از باکتری تهیه گردید. از لوله شامل غلظت نیم مک فارلند با سمپلر، ۱۰۰ $\mu$  برداشته شده و درون لوله آزمایشگاهی که شامل ۰/۹ میلی لیتر آب مقطر است، ریخته شده است. سپس از غلظت حاضر، ۱۰۰ $\mu$  برداشته شده و به درون لوله دارای آب مقطر ریخته شده است. به این ترتیب هر بار غلظت برابر با ۰/۱ غلظت قبل به دست می آید. در نتیجه غلظت هایی از  $1 \times 10^1 \text{ CFU/ml}$  تا  $1 \times 10^8 \text{ CFU/ml}$  برای اندازه گیری توسط زیست حسگر به دست آمد.

### ۵- اندازه گیری غلظت باکتری توسط حسگر

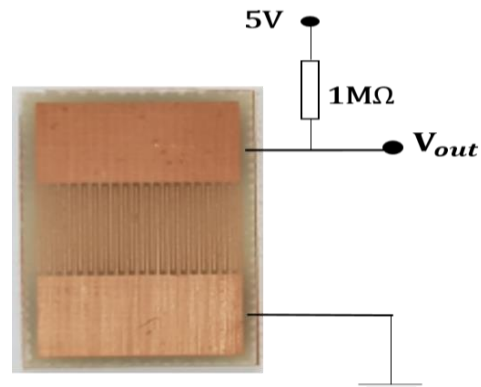
برای اندازه گیری غلظت باکتری و تبدیل آن به ولتاژ مداری به صورت شکل ۶ طراحی شده است. این مدار شامل یک مقاومت یک مگا اهمی، یک منبع تغذیه DC برابر با ۵ ولت و حسگر ساخته شده می باشد. این مدار تغییر مقاومت را به ولتاژ تبدیل می کند. تست حسگر در حضور نور فرابنفش صورت گرفته است. مقاومت حسگر همانند ولتاژ خروجی آن، در حضور نور فرابنفش، افت بیشتری دارد. اکسیژن محیط با دریافت الکترون های آزاد ZnO روی سطح آن جذب می شود.



با تابش نور فرابنفش، در اثر برخورد آن با سطح حسگر، زوج الکترون \_حفره آزاد می شود.



حفره ایجاد شده با یون  $O_2^-$  که از واکنش  $O_2$  محیط و الکترون گرفته شده از اکسید روی تولید شده است، ترکیب شده و  $O_2$  تولید می شود اما الکترون آزاد شده در باند هدایت باقی می ماند و این باعث افزایش هدایت حسگر می گردد. نور فرابنفش به صورت عمودی و به فاصله ۲ سانتی متری از حسگر به آن می تابد.



شکل (۶): مدار تغییر مقاومت به ولتاژ



## ۲-۵- اندازه گیری توسط زیست حسگر باکتری مبتنی

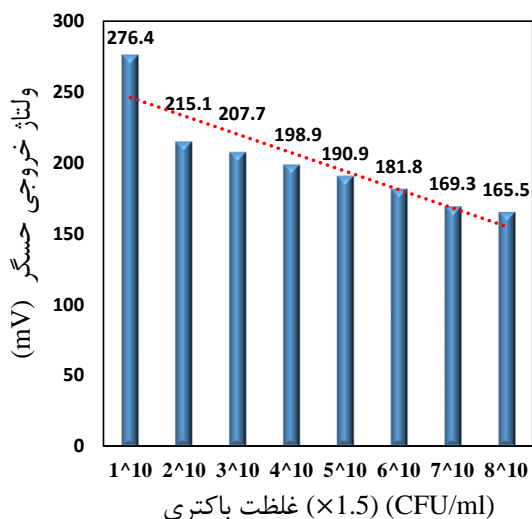
### بر نانوذرات

#### ۱-۲-۵- آزمون شماره ۲

در این آزمون مساحت PCBها برابر با  $30 \times 18/25$  mm<sup>2</sup> و ضخامت و فاصله بین الکترودها برابر با ۲۰۰ میکرومتر است. در این روش با استفاده از روش لایه نشانی قطره ای نانوذرات اکسید روی بر روی PCB قرار گرفته اند. غلظت پودر نانوذرات اکسید روی در این آزمون برابر با ۱۰ میلی گرم بر میلی لیتر است. شکل ۸ نیز حاکی از آن است که با افزایش غلظت باکتری، مقاومت الکتریکی حسگر به دلیل تغییر رسانایی توسط بر هم کنش بین باکتری و نانوذرات ZnO، کاهش یافته و در نتیجه ولتاژ نیز کاهش یافته است.

#### ۲-۲-۵- آزمون شماره ۳

در این آزمون مساحت PCBها برابر با  $30 \times 12$  mm<sup>2</sup> و ضخامت و فاصله بین الکترودها برابر با ۱۰۰ میکرومتر است. با استفاده از روش لایه نشانی قطره ای نانوذرات اکسید روی بر روی PCB قرار گرفته است. غلظت پودر نانوذرات اکسید روی در این آزمون برابر با ۲۰ میلی گرم بر میلی لیتر است. همانطور که در شکل ۹ پیداست مشابه آزمون ۱ با افزایش غلظت باکتری به دلیل کاهش مقاومت، ولتاژ خروجی نیز کاهش می یابد.



شکل (۹): آزمون ۳، تغییرات ولتاژ خروجی حسگر بر حسب غلظت باکتری ای کولای مبتنی بر نانوذرات

#### ۳-۲-۵- آزمون شماره ۴

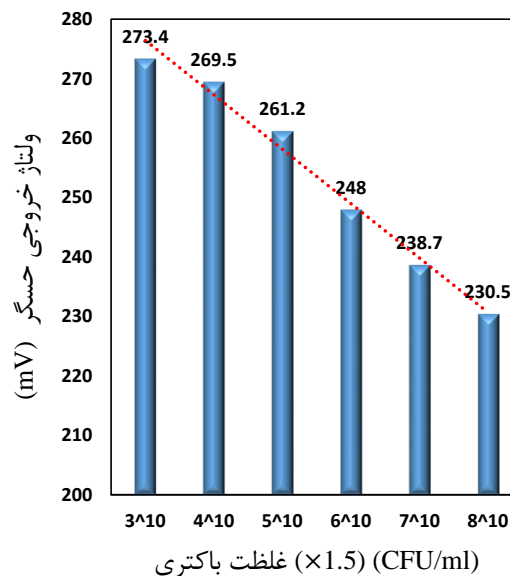
در این آزمون مساحت PCB های مورد استفاده برابر با  $30 \times 12$  میلی متر مربع و ضخامت الکترودها ۱۰۰ میکرومتر و غلظت پودر نانوذرات اکسید روی برابر با ۱۰ میلی گرم بر میلی لیتر است. در این آزمایش به منظور تکرارپذیری ۷ سری حسگر برای اندازه گیری هر غلظت با روش مشابه ساخته شده و هر غلظت مشخص باکتری با ۷ حسگر اندازه گیری شده است. نتایج اندازه گیری ها در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): اندازه گیری هر غلظت با ۷ حسگر مشابه

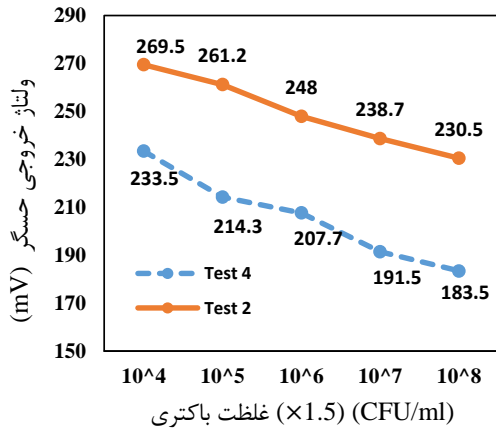
| ولتاژ خروجی حسگرها    |       |       |       |       |       |       | غلظت باکتری CFU/ml    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| V <sub>out</sub> (mV) |       |       |       |       |       |       |                       |
| ۱                     | ۲     | ۳     | ۴     | ۵     | ۶     | ۷     |                       |
| ۲۶۶/۵                 | ۲۴۷/۹ | ۲۳۱/۸ | ۲۱۶   | ۲۰۸/۵ | ۲۰۲/۴ | ۲۳۳/۵ | ۱/۵ × ۱۰ <sup>۴</sup> |
| ۲۵۶/۹                 | ۲۴۵/۹ | ۲۲۶/۳ | ۲۱۰/۲ | ۲۰۶/۲ | ۱۹۴/۳ | ۲۱۴/۳ | ۱/۵ × ۱۰ <sup>۵</sup> |
| ۲۳۴                   | ۲۴۰/۶ | ۲۲۲/۷ | ۱۹۶/۲ | ۱۸۷/۶ | ۱۸۴/۳ | ۲۰۷/۷ | ۱/۵ × ۱۰ <sup>۶</sup> |
| ۲۲۷/۱                 | ۲۳۳/۸ | ۲۱۵/۲ | ۱۹۰/۱ | ۱۷۰/۲ | ۱۸۲/۳ | ۱۹۱/۵ | ۱/۵ × ۱۰ <sup>۷</sup> |
| ۲۱۲/۴                 | ۲۲۰/۳ | ۲۰۴/۳ | ۱۸۴/۹ | ۱۵۸/۳ | ۱۷۴   | ۱۸۳/۵ | ۱/۵ × ۱۰ <sup>۸</sup> |

جدول ۱ بیانگر افت ولتاژ در اثر افزایش غلظت باکتری می باشد که برای هر ۷ حسگر در این آزمون این سیر نزولی قابل مشاهده می باشد.

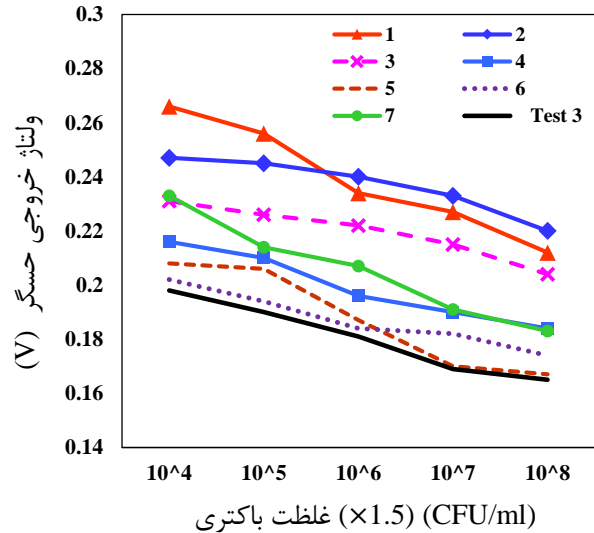
همانطور که در جدول ۱ مشخص است نتایج آزمون شماره ۴ نشان می دهد که خروجی های هر ۷ اندازه گیری برای یک غلظت مشخص توسط زیست حسگرهای مشابه تفاوت هایی در حدود کمتر از چند ده میلی ولت دارند که این نشان دهنده تکرار پذیری قابل قبول سنسورهای ساخته شده می باشد.



شکل (۸): آزمون ۲، تغییرات ولتاژ خروجی حسگر بر حسب غلظت باکتری ای کولای



شکل (۱۱): بررسی اثر ابعاد الکترودهای دندانه شانه ای بر ولتاژ خروجی حسگرها



شکل (۱۰): آزمون ۴، تغییرات ولتاژ خروجی حسگر بر حسب غلظت باکتری ای کولای

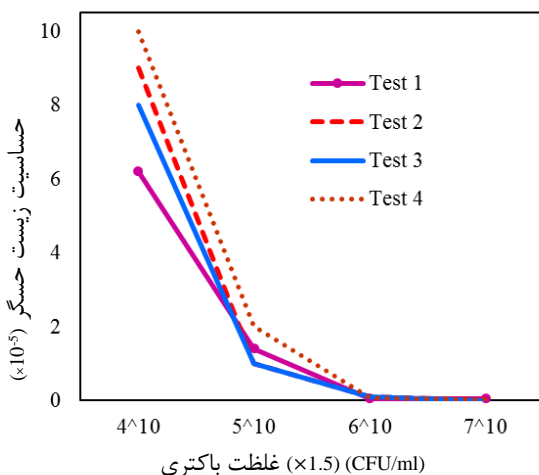
شکل ۱۱ نیز بیانگر همین موضوع می باشد که با کاهش ابعاد PCB و افزایش حساسیت در برخی غلظت ها، افت ولتاژ بیشتری رخ می دهد.

### ۶- حساسیت زیست حسگر

در این قسمت حساسیت زیست حسگر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردیده است.

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta C} = \frac{V_2 - V_1}{C_2 - C_1} \quad (1)$$

شکل ۱۲ نمودار حساسیت حسگر بر حسب غلظت باکتری ای کولای را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است، حسگرهای ساخته شده به روش های لایه نشانی قطره ای که در آنها نانوذرات اکسید روی بر روی PCBها قرار گرفته اند، نسبت به روش هیدروترمال از حساسیت بیشتری برخوردارند. علاوه بر این نکته حائز اهمیت دیگر این است که نمودار حساسیت حسگر در آزمون شماره ۴ از همه بالاتر است.



شکل (۱۲): حساسیت زیست حسگرها

شکل ۱۰ تغییرات ولتاژ خروجی را بر حسب غلظت باکتری برای هفت حسگر ساخته شده در آزمون ۴ را نشان می دهد. همانطور که قابل ملاحظه است همه حسگرها رفتار مشابهی از خود نشان می دهند و اختلاف بین نتایج آنها برای یک غلظت در حدود صدم ولت می باشد که نشان دهنده رفتار مناسب حسگرهای ساخته شده می باشد.

### ۵-۳- بررسی اثر غلظت نانوذرات اکسید روی

در شکل ۱۰ علاوه بر نتایج آزمون ۴، خروجی مربوط به آزمون ۳ نیز نشان داده شده است که در پایین همه منحنی ها قرار گرفته است. آزمون های شماره ۳ و ۴ طوری طراحی شده اند که در آنها الکترودها مشابه بوده ولی غلظت نانوذرات لایه نشانی شده در آزمون ۳ دو برابر غلظت نانوذرات در آزمون ۲ می باشد. در آزمون شماره ۳ غلظت برابر ۲۰ میلی گرم بر میلی لیتر و در آزمون شماره ۴ غلظت، ۱۰ میلی گرم بر میلی لیتر است.

همانطور که انتظار می رفت، نتایج نیز نشان می دهد که به دلیل افزایش در غلظت پودر نانوذرات اکسید روی، افت ولتاژ بیشتری در خروجی حسگر آزمون ۳ رخ داده است. مقایسه حساسیت حسگرها در قسمت های بعدی مقاله انجام گرفته است.

### ۵-۴- بررسی ابعاد PCB

تفاوت آزمون های شماره ۲ و ۴ در ابعاد PCB می باشد. در آزمون شماره ۲ ابعاد PCB برابر با ۱۸/۲۵×۳۰ میلی متر مربع و فاصله الکترودها ۲۰۰ میکرومتر و در آزمون شماره ۴ ابعاد PCB برابر با ۱۲×۳۰ میلی متر مربع و فاصله الکترودها ۱۰۰ میکرومتر بوده است. با مقایسه ابعاد PCBها مشاهده می شود زمانی که ابعاد حسگر کوچک تر می شود به دلیل کاهش فاصله بین الکترودها در محیط بر هم کنش باکتری و اکسید روی، افت ولتاژ در خروجی حسگر بیشتر رخ می دهد.

- network at room temperature", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 16, no. 2, pp. 1-7, 2019.
- [8] M. G. Al-Fandi et al., "Direct electrochemical bacterial sensor using ZnO nanorods disposable electrode" Sensor Review, vol. 38, no. 3, pp. 326-334, 2018.
- [9] C.-L. Hsu, L.-F. Chang, and T.-J. Hsueh, "Light-activated humidity and gas sensing by ZnO nanowires grown on LED at room temperature" Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 249, pp. 265-277, 2017.
- [10] Y.-T. Tsai, S.-J. Chang, I.-T. Tang, Y.-J. Hsiao, and L.-W. Ji, "High density novel porous ZnO nanosheets based on a microheater chip for ozone sensors", IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 13, pp. 5559 - 5565, 2018.
- [11] M. Firouzi and E. Ghanbari Adivi, "Electronic Structure and Optical Properties of ZnO Nanotubes", Iranian Conference on Optics and Photonics and Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology, Research vol. 22, no. 0, pp. 774-777, 2016.
- [12] M. J. Kiani and A. Salehi, "SnO<sub>2</sub> Deposited Thin-Film with Dip-Coating Method", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 13, no. 4, pp. 65-70, 2017.
- [13] M. J. Kiani and M. Zare, "Fabrication of Tin Oxide gas-sensor by Sol Gel method and rotary deposition technique", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 11, no. 2, pp. 43-48, 2014.
- [14] G. R. Suma, N. K. Subramani, S. Sachhidananda, S. V. Satyanarayana, and Siddaramaiah, "Nanotechnology Enabled E.Coli Sensors: An Opto-Electronic Study", Materials Today: Proceedings, vol. 4, no. 10, pp. 11300-11304, 2017.
- [15] M. Janik, M. Koba, A. Celebańska, W. J. Bock, and M. Śmietana, "Live E. coli bacteria label-free sensing using a microcavity in-line Mach-Zehnder interferometer", Scientific Reports, vol. 8, no. 1, p. 17176, 2018.
- [16] K. M. Wibowo et al., "Detection of Escherichia Coli Bacteria in Wastewater by using Graphene as a Sensing Material", Journal of Physics: Conference Series, vol. 995, p. 012063, 2018.
- [17] M. G. Beeman et al., "Electrochemical Detection of E. coli O157:H7 in Water after Electrocatalytic and Ultraviolet Treatments Using a Polyguanine-Labeled Secondary Bead Sensor", Sensors (Basel), vol. 18, no. 5, p. 1497, 2018.
- [18] S. Ghosh Dastider, A. Abdullah, I. Jasim, N. S. Yuksek, M. Dweik, and M. Almasri, "Low concentration E. coli O157:H7 bacteria sensing using microfluidic MEMS biosensor", Review of Scientific Instruments, vol. 89, no. 12, p. 125009, 2018.
- [19] V. Gerbreders et al., "Hydrothermal synthesis of ZnO nanostructures with controllable morphology change", CrystEngComm, vol. 22, no. 8, pp. 1346-1358, 2020.

همچنین ترتیب قرار گرفتن منحنی‌ها نشان می‌دهد که حسگرهای با فاصله ۱۰۰ میکرونی بین الکترودها و با غلظت نانوذرات ۱۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر نسبت سایر حسگرها حساسیت بیشتری از خود نشان داده‌اند.

به این ترتیب در این مقاله، نشان داده شد که برهم کنش بین اکسید روی و باکتری‌ای کولای باعث افزایش رسانایی و کاهش مقاومت می‌گردد. حسگرهای ساخته شده در این مقاله پیشنهادهای مناسبی جهت ساخت اولین حسگرهای تشخیص باکتری به روش‌های الکترونیکی می‌باشند که بسیار مورد علاقه پژوهشگران فعال در این زمینه می‌باشد.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، زیست‌حسگر باکتری‌ای کولای بر مبنای نانومیله‌ها و نانوذرات اکسید روی و با استفاده از دو روش رشد هیدروترمال و لایه-نشانی قطره‌ای ساخته شده است. تصویر SEM موجود رشد موفق نانومیله‌ها را با اثبات می‌رساند. پس از آزمایشات متعدد این نتیجه حاصل شد که با افزایش غلظت باکتری، به دلیل رسانایی سلول‌های باکتری، مقاومت حسگر کاهش می‌یابد که به دنبال آن ولتاژ خروجی حسگر نیز کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر غلظت پودر نانوذرات، اکسید روی و کوچک کردن ابعاد حسگر در روش لایه‌نشانی قطره‌ای، ولتاژ حسگر افت بیشتری پیدا می‌کند و حساسیت افزایش می‌یابد.

## مراجع

- [1] A. Hasanbiki, A. Rezaee, H. Masoumbigi, and H. Hossini, "Removal of Escherichia coli from Contaminated Water Using Bipolar Electrochemical Systems", Journal of North Khorasan University of Medical Sciences, vol. 7, no. 3, pp. 551-560, 2016.
- [2] S. Pal, S. Mondal, and J. Maity, "In situ generation and deposition of ZnO nanoparticles on cotton surface to impart hydrophobicity: investigation of antibacterial activity", Materials Technology, vol. 33, no. 8, pp. 555-562, 2018.
- [3] S. M. AL-Jawad, S. H. Sabeeh, A. A. Taha, and H. A. Jassim, "Studying structural, morphological and optical properties of nanocrystalline ZnO: Ag films prepared by sol-gel method for antimicrobial activity", Journal of Sol-Gel Science and Technology, vol. 87, no. 2, pp. 362-371, 2018.
- [4] Y. Al-Hadeethi et al., "2D Sn-doped ZnO ultrathin nanosheet networks for enhanced acetone gas sensing application", Ceramics International, vol. 43, no. 2, pp. 2418-2423, 2017.
- [5] K. S. Lee et al., "Ultrasonic fabrication of flexible antibacterial ZnO nanopillar array film", Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, vol. 170, pp. 172-178, 2018.
- [6] V. Errico et al., "High-Density ZnO Nanowires as a Reversible Myogenic-Differentiation Switch ", CS applied materials & interfaces, vol. 10, no. 16, pp. 14097-14107, 2018.
- [7] S. Nasirian and M. M. Shokravi, "The study of humidity effect on carbon dioxide gas sensing properties of zinc oxide nanowires assisted by polyvinyl alcohol