

حسگر هیدروژن پراکسید بر پایه نانوساختار Ag/TiO₂

مهدی سیمپاری و فرامرز صفری*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶

چکیده

در این پژوهش، برای تشخیص هیدروژن پراکسید به روش رنگ‌سنجی نانوکامپوزیت تیتانیم دی‌اکسید و نانوذرات نقره بکار رفت و عملکرد این دو مورد مقایسه قرار گرفت. برای سنتز نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید از روش تخلیه الکتریکی در محیط مایع استفاده شد و سنتز نانوذرات نقره و اضافه نمودن نقره به تیتانیم دی‌اکسید به روش احیای شیمیایی نترات نقره انجام گرفت. ترکیبات بدست آمده توسط واکاوی‌های پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مشخصه‌یابی گردیدند. واکاوی پراش پرتو ایکس نشان دهنده تشکیل تیتانیم دی‌اکسید با ساختار روتایل و نقره به صورت فلزی بود که بر طبق رابطه شرر اندازه متوسط دانه‌ها در نمونه تیتانیم دی‌اکسید ۵ nm و در نمونه تیتانیم دی‌اکسید/نقره ۱۰ nm بود. متوسط اندازه ذرات بدست آمده برای نانوکامپوزیت تیتانیم دی‌اکسید/نقره در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ۳۲ nm و در تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری ۵ nm بود. برای تشخیص میزان غلظت هیدروژن پراکسید از تغییرات شدت بیشینه جذب نوری ترکیبات در محدوده طول موج ۳۰۰-۶۰۰ nm با اندازه‌گیری توسط دستگاه طیف‌سنج مرئی-فرابنفش انجام شد. نمونه‌های تیتانیم دی‌اکسید/نقره و نقره هر دو در بازه غلظت ۱۰۰-۲۰ μM از هیدروژن پراکسید تغییر رنگ قابل مشاهده داشتند. در این روش با توجه به این که افزایش تغییرات شدت بیشینه جذب در یک بازه ثابت از تغییرات غلظت موجب افزایش میزان حساسیت حسگر می‌شود پاسخ‌دهی نمونه تیتانیم دی‌اکسید/نقره در بازه ثابت ۱۰۰-۲۰ μM از هیدروژن پراکسید نسبت به نمونه نقره دو برابر بوده و حساسیت بیشتری ایجاد کرد. همچنین با کاهش میزان نقره در نمونه کامپوزیت نشان داده شد که با حفظ میزان حساسیت می‌توان برای بازه ۴۰-۲۰ μM مقدار نقره مصرفی را به یک سوم کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: نانوساختار تیتانیم دی‌اکسید، نانوذرات نقره، تشخیص هیدروژن پراکسید، رنگ‌سنجی.

۱- مقدمه

کننده در صنایع کاغذ داراست [۱-۳]. همچنین این ترکیب به عنوان یکی از مهمترین ترکیبات در متابولیسم‌های مربوط به اکسیداسیون در موجودات زنده شناخته می‌شود [۴]. همه این موارد نشان دهنده اهمیت تشخیص هیدروژن پراکسید

هیدروژن پراکسید کاربردهای متنوعی از جمله عامل اکسید کننده در تصفیه آب، نگهدارنده در صنایع غذایی و سفید

* **عهده‌دار مکاتبات:** فرامرز صفری

نشانی: تهران، دانشگاه امام علی (ع)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

تلفن: ۰۲۱-۶۱۰۴۸۲۴۷، **دورنگار:** ۰۲۱-۶۶۴۶۷۴۴۴، **پست الکترونیکی:** safari.faramarz@outlook.com

می‌باشند اما روی دیگر ارزش ساخت حسگر هیدروژن پراکسید در تشخیص ماده منفجره تری استن تری پراکسید است. این ماده منفجره به دلیل روش ساخت آسان و پیش ماده‌های قابل دسترس در حملات تروریستی بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. تشخیص سریع و دقیق مواد منفجره و یا پیش ماده‌های ساخت آن‌ها یکی از مهمترین عوامل در پیشگیری از وقوع حملات تروریستی می‌باشد [۶]. حسگرهای بسیاری برای تشخیص مواد منفجره بر پایه عنصر نیتروژن ساخته شده‌اند اما عدم حضور این عنصر در ترکیب تری استن تری پراکسید باعث ناکارآمدی این دسته از حسگرها در تشخیص این ماده منفجره شده است [۷]. از همین رو پژوهش‌های صورت گرفته برای ساخت حسگر تری استن تری پراکسید بر تشخیص هیدروژن پراکسید تمرکز یافته‌اند زیرا هیدروژن پراکسید به عنوان پیش ماده ساخت این ماده منفجره بوده و نیز تجزیه اسیدی تری استن تری پراکسید موجب تولید هیدروژن پراکسید می‌شود [۸].

برای تشخیص هیدروژن پراکسید از روش‌های متنوعی اعم از تیتراسیون، رنگ‌سنجی، نورتابی، نورافشانی شیمیایی و الکتروشیمیایی استفاده گردیده است [۹]. از تیتانیم دی‌اکسید، نقره و کامپوزیت‌های آن‌ها با ترکیبات دیگر از قبیل منگنز دی‌اکسید، بیسموت وانادات، پلی آنیلین، لپیدوکروسیت، کبالت اکسید و گرافن اکسید در روش‌های الکتروشیمیایی برای ساخت حسگر هیدروژن پراکسید استفاده شده است [۱۰-۱۴]. در پژوهشی دیگر از نانوذرات هسته و پوسته $Ag@TiO_2$ به روش الکتروشیمیایی نیز بهره برده‌اند [۱۵]. همچنین پیش از این نانوذرات نقره با شکل‌های متفاوت از جمله کروی، هرمی و مکعبی در تشخیص هیدروژن پراکسید به روش رنگ‌سنجی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند [۱۶]. با این همه، مزایای روش رنگ‌سنجی که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به صرفه‌جویی در زمان، کم هزینه بودن، سادگی و راحتی کاربرد عملی آن اشاره نمود موجب تمرکز بیشتر بر روی این روش شده و ترکیبات مختلفی برای ساخت حسگرها بر پایه

رنگ‌سنجی در حال توسعه است [۱۷]. آنچه در این پژوهش مطرح است بهبود خواص نانوذرات کروی نقره با اضافه کردن نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید در فرآیند سنتز، برای تشخیص بهتر هیدروژن پراکسید در محیط مایع به روش رنگ‌سنجی می‌باشد. با توجه به مزایای روش تخلیه الکتریکی که از جمله آن‌ها می‌توان به تجهیزات ساده، درصد خلوص بالای محصول و تک‌مرحله‌ای بودن فرآیند اشاره نمود از این روش برای سنتز نانوذرات تیتانیم استفاده گردیده است. همچنین از روش رسوب‌دهی شیمیایی برای اضافه نمودن نقره به ساختار تیتانیم استفاده گردیده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دهنده بهبود خواص نانوذرات نقره در دقت تشخیص هیدروژن پراکسید بوسیله افزودن نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید در هنگام سنتز نانوذرات نقره نسبت به نانوذرات نقره خالص می‌باشد. همچنین بررسی کاهش میزان اولیه نقره در فرآیند سنتز نشان داد که با افزودن تیتانیم دی‌اکسید می‌توان با حفظ دقت در بازه کمتری از غلظت هیدروژن پراکسید میزان مصرف نقره در تشخیص را به یک سوم کاهش داد.

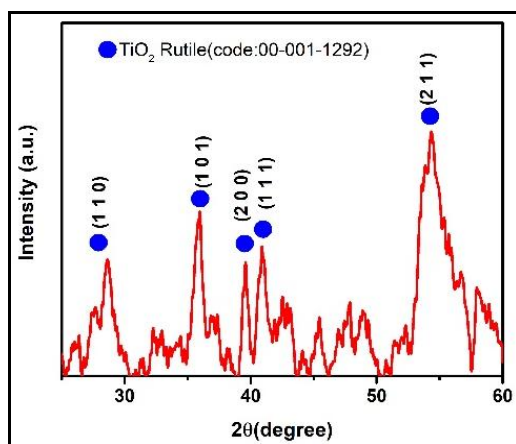
۲- فعالیت‌های تجربی

برای سنتز نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید از دو الکترود تیتانیم با خلوص بسیار بالا استفاده گردید. همچنین از نیترات نقره ($AgNO_3$) شرکت قطران شیمی، هیدروژن پراکسید (H_2O_2) شرکت دکتر مجللی و از تری سدیم سیترات ($Na_3C_6H_5O_7$) شرکت مرک در این پژوهش استفاده شد. در روش تخلیه الکتریکی برای سنتز نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید طبق شکل ۱ دو الکترود از جنس تیتانیم به یک منبع تغذیه DC متصل گردیده و توسط آزمایشگر به صورت پالسی دو الکترود با یکدیگر برخورد می‌کنند. در زمان برخورد به واسطه پلاسمای ایجاد شده در بین دو الکترود و تبخیر دو الکترود نانوذرات تیتانیم تشکیل می‌گردند. برای سنتز نانوذرات تیتانیم به روش تخلیه الکتریکی در یک بشر ۴۰۰ میلی لیتری با حجم

برای ایجاد غلظت‌های بین صفر تا $100 \mu\text{M}$ افزوده شد و پس از اضافه کردن هیدروژن پراکسید با آب مقطر به حجم 10 ml رسانده شده‌اند و بعد از مدت دو ساعت بر روی نمونه‌ها طیف‌سنجی مرئی-فراابنش انجام شده است. مورفولوژی و اندازه ذرات بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN و ساختار بلوری نانوکامپوزیت سنتز شده بوسیله دستگاه واکاوی پراش پرتو ایکس مدل GNR-explorer مورد مطالعه قرار گرفتند. برای بررسی تغییرات میزان جذب نوری از طیف سنج مرئی-فراابنش مدل SPUV-26 استفاده شده است. دستگاه شرکت Winner مدل 200M-2011 به عنوان منبع تغذیه در فرآیند تخلیه الکتریکی بکار رفت.

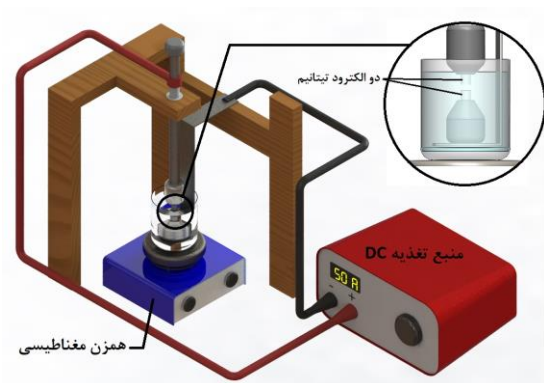
۳- نتایج و بحث

جهت تشخیص ساختار بلوری نمونه‌های سنتز شده از آن‌ها واکاوی پراش پرتو ایکس گرفته شده است. شکل ۲ که در آن طیف پراش پرتو ایکس نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید آمده است بر طبق استاندارد کد ۱۲۹۲-۰۰۱-۰۰۰ نشان می‌دهد که نانوذرات تشکیل شده‌ی دارای ساختار تتراگونال بوده و در زوایای $27/5^\circ$ ، $36/0^\circ$ ، $41/2^\circ$ ، $44/1^\circ$ و $54/2^\circ$ درجه دارای بیشینه پراش بوده که به ترتیب ناشی از پراش صفحات (۱۱۰)، (۱۰۱)، (۲۰۰)، (۱۱۱) و (۲۱۱) می‌باشند.



شکل ۲: طیف پراش پرتو ایکس نانوساختار تیتانیم دی‌اکسید.

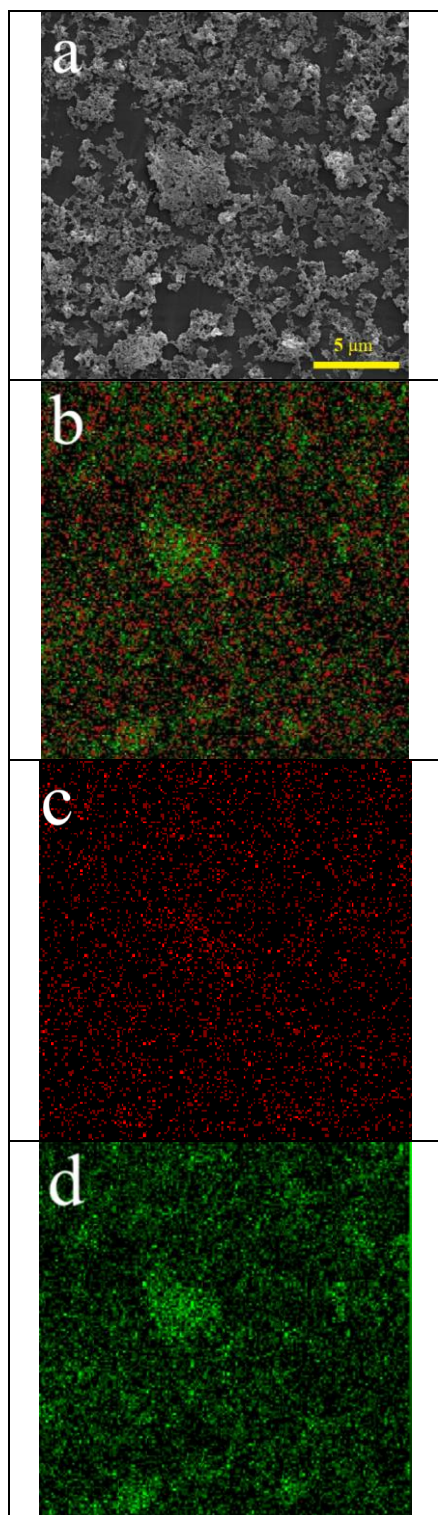
350 ml آب مقطر جریان 50 A بین دو الکترود به مدت 10 min



شکل ۱: چیدمان دستگاه تخلیه الکتریکی جهت سنتز نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید.

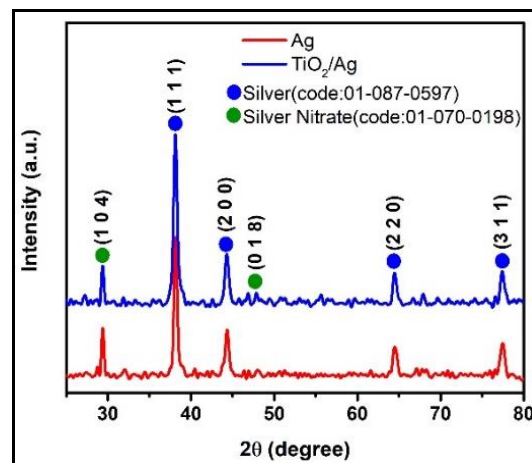
به صورت پالسی اعمال گردیده است. روش احیا شیمیایی یکی از روش‌های مرسوم در تهیه نانومواد می‌باشد. برای احیای نقره و سنتز نانوذرات آن طبق پژوهشی مشابه عمل گردیده است [۱۸]. برای اضافه کردن نقره به نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید 30 mg نیترات نقره به 50 ml آب مقطر اضافه گردید و تا به جوش آمدن محلول حرارت داده شد. همچنین 3 ml محلول تری سدیم سیترات 1 درصد وزنی به 50 ml کلئوئید بدست آمده از تخلیه الکتریکی تیتانیم افزوده و تا به جوش آمدن حرارت داده شد. پس از به جوش آمدن هر دو محلول، محلول تخلیه الکتریکی تیتانیم به محلول نیترات نقره اضافه گردید و پس از شروع تغییر رنگ از آبی به قهوه‌ای حرارت قطع شد. برای سنتز نانوذرات نقره همان میزان نیترات نقره به 100 ml آب مقطر اضافه و پس از اعمال حرارت تا به جوش آمدن با اضافه کردن همان میزان تری سدیم سیترات و تغییر رنگ به زرد نانوذرات نقره سنتز گردید. همچنین در سنتز نمونه تیتانیم دی‌اکسید/نقره (۱/۳) میزان نیترات نقره و تری سدیم سیترات به یک سوم مقدار اولیه کاهش یافته است.

جهت انجام آزمایش تشخیص هیدروژن پراکسید در هر مرحله به 5 ml از کلئوئید نانوساختار سنتز شده میزان مشخصی بین صفر تا 5 میلی‌لیتر از محلول هیدروژن پراکسید $0/2 \text{ mM}$



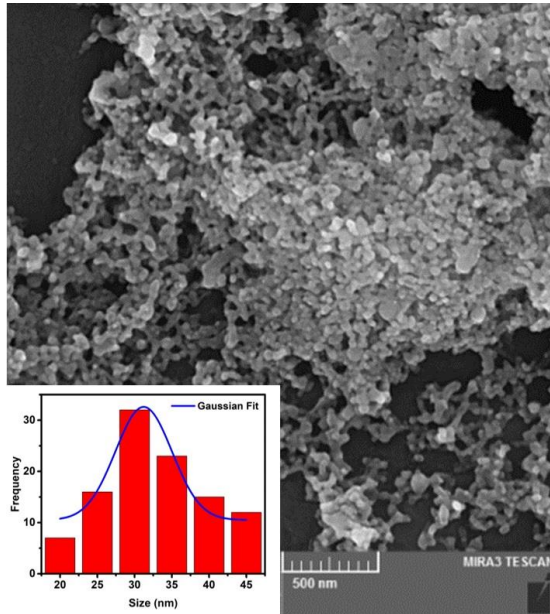
شکل ۴: (a) تصویر محدوده‌ی واکاوی، (b) پراکندگی عناصر تیتانیوم (قرمز) و نقره (سبز) منطبق شده بر یکدیگر، (c) توزیع پراکندگی عنصر تیتانیوم در نانوساختار تیتانیوم دی‌اکسید/نقره و (d) توزیع پراکندگی عنصر نقره در نانوساختار تیتانیوم دی‌اکسید/نقره.

در طیف پراش پرتو ایکس نانوذرات نقره که در شکل ۳ آمده نشان دهنده تشکیل ساختار مکعبی نقره بر طبق استاندارد کد ۰۵۹۷-۰۸۷-۰۱ می‌باشد. طبق طیف نشان داده شده صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) به ترتیب در زوایای ۳۸/۱، ۴۴/۳، ۶۴/۴ و ۷۷/۴ درجه دارای بیشینه پراش می‌باشند. همچنین طیف بدست آمده نشان دهنده آن است که بخشی از نیترات نقره در فرآیند سنتز احیا نشده و در ترکیب کلئوئید بدست آمده باقیمانده است که بر طبق استاندارد کد ۰۱۹۸-۰۷۰-۰۱ بیشینه پراش‌های رخ داده در زوایای ۲۹/۴ و ۴۸/۴ درجه به ترتیب مربوط به صفحات (۱۰۴) و (۰۱۸) ساختار رومبوهدرال نیترات نقره می‌باشند. همچنین در طیف نانو کامپوزیت تیتانیوم دی‌اکسید نقره که در شکل ۳ آمده است به دلیل غلظت بیشتر نقره در نمونه بیشینه پراش‌های مشابه طیف نانوذرات نقره مشاهده می‌شود و تفاوت اندکی در محل بیشینه پراش تیتانیوم دی‌اکسید در حدود ۵۳-۵۶ درجه در طیف کامپوزیت تیتانیوم دی‌اکسید/نقره نسبت به طیف نقره مشاهده می‌شود.

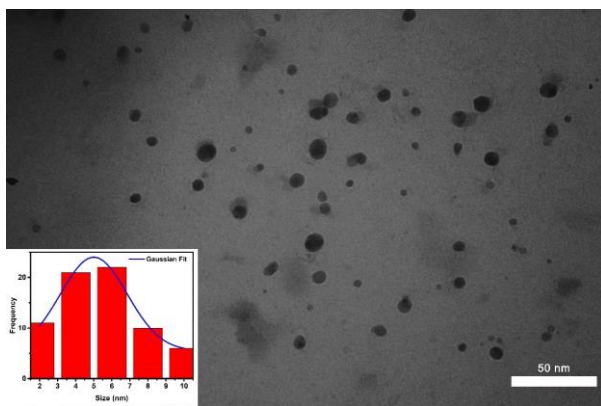


شکل ۳: طیف پراش پرتو ایکس نانوذرات نقره و نانوساختار تیتانیوم دی‌اکسید/نقره.

برای محاسبه اندازه دانه‌بندی ذرات از رابطه شرر (رابطه ۱) استفاده شد. اندازه دانه‌ها با توجه به طیف پراش پرتو ایکس ترکیبات بر طبق این رابطه برای نمونه تیتانیوم دی‌اکسید ۵ nm



شکل ۵: تصویر SEM از نانوساختار تیتانیم دی‌اکسید/نقره و نمودار توزیع اندازه ذرات.



شکل ۶: تصویر TEM از نانوساختار تیتانیم دی‌اکسید/نقره و نمودار توزیع اندازه ذرات.

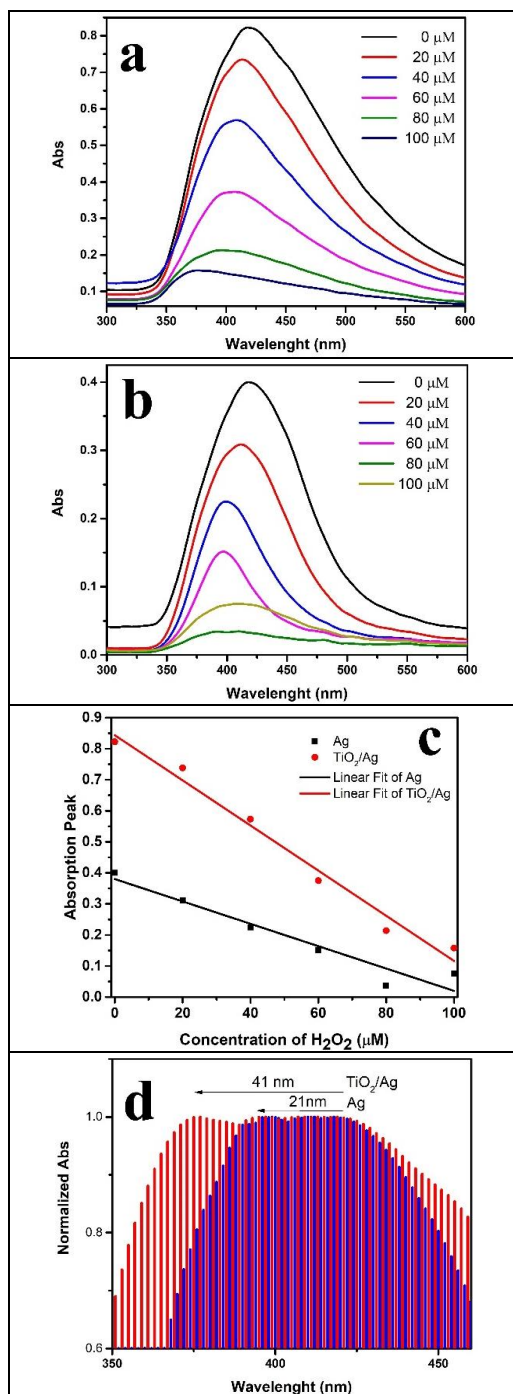
برای تعیین عملکرد تغییر رنگ محلول در حضور هیدروژن پراکسید با اضافه کردن مقادیر مشخصی هیدروژن پراکسید به مقادیر ثابتی از کلوئیدها انجام شد. عملکرد تغییر رنگ کلوئیدهای حاوی نانوذرات مختلف در شکل ۷ نشان داده شده که همانطور که مشاهده می‌شود تیتانیم دی‌اکسید به تنهایی در برابر هیدروژن پراکسید در بازه تغییرات غلظت $100-20 \mu\text{M}$ تغییر رنگ نداده است (در تصاویر غلظت هیدروژن پراکسید از چپ به راست افزایش یافته است) اما مابقی نانوذرات که حاوی نقره بودند، همین بازه تغییرات باعث ایجاد تغییر رنگ قابل مشاهده در کلوئید شده است.

و برای نمونه تیتانیم دی‌اکسید/نقره 10 nm بدست آمد. در این رابطه d قطر متوسط دانه‌ها بر حسب nm ، λ طول موج پرتو ایکس بر حسب nm ، β پهنای بزرگترین بیشینه در نصف ارتفاع آن بر حسب رادیان و θ زاویه وقوع پراش بزرگترین بیشینه می‌باشد [۱۹].

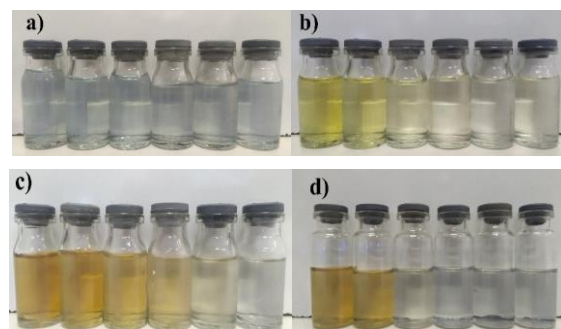
$$d = 0.9\lambda/\beta\cos\theta \quad (1)$$

برای بررسی توزیع پراکندگی عناصر تشکیل دهنده نانوساختار تیتانیم دی‌اکسید/نقره از نمونه آنالیز (MAP) گرفته شد و در شکل ۴ (a) محدوده تحت واکاوئی نشان داده شده است. طبق نتایج بدست آمده از این آزمایش که در شکل ۴ (c) و (d) آمده است دو جزء اصلی که تیتانیم و نقره می‌باشند از پراکندگی مناسبی در نمونه برخوردار بوده و طبق شکل ۴ (b) که پراکندگی دو عنصر بر یکدیگر منطبق شده‌اند تجمع هر کدام از اجزا در عدم حضور جز دیگر مشاهده نمی‌گردد.

برای تعیین اندازه ذرات و نوع شکل ذرات سنتز شده از نمونه‌ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد. طبق تصاویر بدست آمده از این آزمایش که در شکل ۵ نشان داده شده است ذرات بطور تقریبی کروی شکل می‌باشند. همچنین بر اساس نمودار توزیع اندازه ذرات و منحنی گاوسی منطبق شده بر آن که در شکل ۵ آمده است میانگین اندازه ذرات برای نانوساختار تیتانیم دی‌اکسید/نقره مقدار $32 \pm 3 \text{ nm}$ می‌باشد. همچنین در شکل ۶ تصویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری و نمودار توزیع اندازه ذرات نشان داده شده است که میانگین اندازه ذرات $5 \pm 0.1 \text{ nm}$ بوده است. مقدار خطای استاندارد در متوسط اندازه نشان دهنده توزیع یکنواخت اندازه نانوذرات بوده و این توزیع یکنواخت نشان دهنده فعال بودن تنها یک سازوکار موثر در تشکیل نانو کامپوزیت می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در این روش می‌توان فرآیند تشکیل نانو کامپوزیت را با کنترل عوامل آزمایش کنترل نمود.



شکل ۸: تغییرات طیف مرئی-فرابنفش در برابر تغییرات غلظت هیدروژن پراکسید، (a) تیتانیوم دی اکسید/نقره، (b) نقره، (c) تغییرات مقدار بیشینه جذب با تغییرات غلظت هیدروژن پراکسید و (d) جابه جایی λ بیشینه جذب با تغییرات غلظت هیدروژن پراکسید.



شکل ۷: عملکرد تغییر رنگ در برابر هیدروژن پراکسید، (a) تیتانیوم دی اکسید، (b) نقره، (c) تیتانیوم دی اکسید/نقره و (d) تیتانیوم دی اکسید/نقره (۱/۳).

برای بررسی بهتر میزان تغییر رنگ نمونه‌ها در برابر تغییر غلظت هیدروژن پراکسید بر روی آن‌ها طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش صورت پذیرفت. بر طبق طیف‌های بدست آمده از نمونه‌های تیتانیوم دی اکسید/نقره و نقره که به ترتیب در شکل ۸ (a) و (b) آمده است با افزایش میزان غلظت هیدروژن پراکسید میزان جذب در نمونه‌ها کاهش می‌یابد. اما این تغییرات در میزان جذب تیتانیوم دی اکسید/نقره نسبت به نقره با شیب بیشتری رخ داده و تغییرات بازه میزان بیشینه جذب طبق شکل ۸ (c) نمونه نانوساختار تیتانیوم دی اکسید/نقره نسبت به نقره دو برابر می‌باشد.

تغییر در مقدار بیشینه جذب به واسطه واکنش هیدروژن پراکسید با ذرات و تخریب نقره و تبدیل آن به یون نقره و در نتیجه تغییر در تشدید پلاسمون سطحی ذرات رخ داده است [۲۰-۲۲]. همچنین طبق شکل ۸ (d) طول موجی که در آن بیشینه جذب رخ می‌دهد در نمونه تیتانیوم دی اکسید/نقره با افزایش غلظت هیدروژن پراکسید ۴۱ nm به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر انتقال یافته در صورتی که این مقدار برای نمونه نقره ۲۱ nm می‌باشد که این تغییر طول موج بیشینه جذب به دلیل تغییر در ضریب شکست محیط به واسطه تغییر غلظت هیدروژن پراکسید صورت گرفته است [۲۳، ۲۴].

بازه‌های تا حدی مشابه و بیشتر از حساسیت بالاتری برخوردار می‌باشد. همچنین نمونه نقره با آن که در بازه کمتری از تغییرات غلظت نسبت به دیگر منابع دارای پاسخ‌دهی بوده اما در مقابل میزان حساسیت آن بیشتر از نمونه‌های دیگر است. همچنین نمونه تیتانیم دی‌اکسید/نقره با حفظ بازه تشخیص نمونه نقره میزان حساسیت را تا دو برابر افزایش داده است.

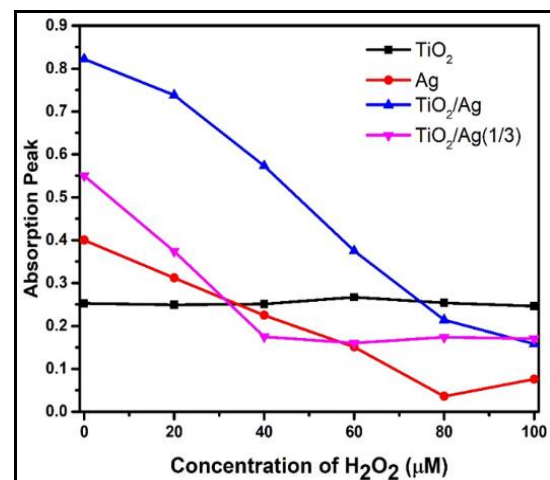
جدول ۱: مقایسه کامپوزیت‌های حاوی نقره جهت تشخیص هیدروژن پراکسید به روش رنگ‌سنجی.

مرجع	نسبت تغییرات میزان بیشینه (a.u.) جذب به تغییرات غلظت (μM)	بازه ی تشخیص هیدروژن پراکسید (μM)	ترکیب ماده
[۲۵]	6×10^{-3}	۰/۰۱ - ۳۰	Cellulose/Ag
	0.5×10^{-3}	۶۰ - ۶۰۰	
[۲۶]	1.5×10^{-3}	۰/۱ - ۱۰۰۰	Ag/Silica
[۲۷]	1×10^{-3}	۰/۱ - ۱۰۰۰	Cu-Ag/g- $\text{C}_3\text{N}_4/\text{ZIF}$
[۲۸]	1×10^{-3}	۶۰ - ۲۰۰	$\alpha\text{-AgVO}_3$
[۲۹]	9×10^{-3}	۱ - ۲۰	Ag/CoO
مقاله پیش‌رو	3.5×10^{-3}	۲۰ - ۱۰۰	Ag
	7×10^{-3}	۲۰ - ۱۰۰	TiO_2/Ag
	1.0×10^{-3}	۲۰ - ۴۰	$\text{TiO}_2/\text{Ag}(1/3)$

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید به روش تخلیه الکتریکی سنتز شد و نقره به روش احیای شیمیایی به آن اضافه گردید که بطور خلاصه در مقایسه نانوذرات نقره و نانو کامپوزیت تیتانیم دی‌اکسید/نقره برای تشخیص هیدروژن پراکسید نشان داده شد که نانو کامپوزیت تیتانیم دی‌اکسید/نقره حساسیت به نسبت بیشتری داراست و این موضوع ناشی از میزان تغییرات بیشتر شدت بیشینه جذب نوری در یک بازه ثابت از تغییرات غلظت هیدروژن پراکسید است. همچنین نتایج بدست آمده از کاهش میزان نقره در نمونه کامپوزیت نشانگر قابلیت حفظ حساسیت در بازه کمتری از تغییرات غلظت هیدروژن پراکسید بود.

تغییرات مقدار بیشینه طیف کلویدهای مختلف در برابر تغییر غلظت هیدروژن پراکسید در شکل ۹ ترسیم شده است. طبق نتایج بدست آمده مقدار جذب تیتانیم دی‌اکسید بطور تقریبی ثابت بوده و نمونه تیتانیم دی‌اکسید/نقره (۱/۳) نشان می‌دهد که با کاهش مقدار نقره در ترکیب درصد کامپوزیت بازه تشخیص از $100 \mu\text{M}$ به $40 \mu\text{M}$ کاهش یافته اما در همین بازه چهل میکرومولاری شیب تغییرات مقدار جذب مشابه نمونه تیتانیم دی‌اکسید/نقره می‌باشد.



شکل ۹: تغییرات مقدار بیشینه جذب بر حسب تغییرات غلظت هیدروژن پراکسید.

در جدول ۱ مقایسه‌ای بین ترکیبات مورد استفاده قرار گرفته در این کار با چند حسگر دیگر که از عنصر نقره در روش رنگ‌سنجی تشخیص هیدروژن پراکسید استفاده نموده‌اند انجام شده است. دو مولفه مهم در تشخیص هیدروژن پراکسید، یکی بازه غلظت آن در نمونه و دیگری میزان پاسخ‌دهی سیستم به تغییرات این غلظت است. در روش رنگ‌سنجی که پاسخ سیستم به تغییر غلظت، تغییر رنگ و به نوعی تغییر در میزان بیشینه جذب نوری نمونه می‌باشد با افزایش میزان تغییرات بیشینه جذب در یک بازه ثابت از تغییرات غلظت، میزان حساسیت پاسخ‌دهی سیستم افزایش یافته و به تبع آن میزان حد تشخیص بهبود می‌یابد [۱۶]. همانطور که در جدول ۱ بیان گردیده نمونه تیتانیم دی‌اکسید/نقره (۱/۳) در مقایسه با مرجع ۲۵ و مرجع ۲۹

مراجع

- [15] M.M. Khan, S.A. Ansari, J. Lee, M.H. Cho, *Materials Science and Engineering-C*, **33**, 2013, 4692.
- [16] L. Zhang, L. Li, *Analytical Methods*, **8**, 2016, 6691.
- [17] K. Wu, X. Zhao, M. Chen, H. Zhang, Z. Liu, X. Zhang, X. Zhu, Q. Liu, *New Journal of Chemistry*, **42**, 2018, 9578.
- [18] A. Ziashahabi, M. Prato, Z. Dang, R. Poursalehi, N. Naseri, *Scientific Reports*, **9**, 2019, 11839.
- [19] D. Komaraiah, E. Radha, J. Sivakumar, M.V. Ramana Reddy, R. Sayanna, *Optical Materials*, **108**, 2020, 110401.
- [20] A. Scroccarello, F. Della Pelle, G. Ferraro, E. Fratini, F. Tempera, E. Dainese, D. Compagnone, *Talanta*, **222**, 2021, 121682.
- [21] E. Alzahrani, *Analytical Chemistry Insights*, **12**, 2017, 1.
- [22] R.G. Saratale, G.D. Saratale, S.K. Cho, G. Ghodake, A. Kadam, S. Kumar, S.I. Mulla, D.-S. Kim, B.-H. Jeon, J.S. Chang, H.S. Shin, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **99**, 2019, 239.
- [23] A.K. Pathak, V.K. Singh, *IEEE Photonics Technology Letters*, **32**, 2020, 465.
- [24] S. Jiao, S. Gu, H. Fang, H. Yang, *Plasmonics*, **14**, 2019, 685.
- [25] K.B.R. Teodoro, F.L. Migliorini, W.A. Christinelli, D.S. Correa, *Carbohydrate Polymers*, **212**, 2019, 235.
- [26] Z. Zhang, Q. Liu, Y. Liu, R. Qi, L. Zhou, Z. Li, J. Yun, R. Liu, Y. Hu, *Nano*, **15**, 2020.
- [27] Q. Pan, Y. Kong, K. Chen, M. Mao, X. Wan, X. She, Q. Gao, Y. He, G. Song, *Molecules*, **25**, 2020.
- [28] Y. Wang, D. Zhang, J. Wang, *Mikrochim Acta*, **185**, 2017, 1.
- [29] J. Lian, D. Yin, S. Zhao, X. Zhu, Q. Liu, X. Zhang, X. Zhang, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **603**, 2020, 125238.
- [1] R. Guan, X. Yuan, Z. Wu, L. Jiang, Y. Li, G. Zeng, *Chemical Engineering Journal*, **339**, 2018, 519.
- [2] K. Czyzewska, A. Trusek, *Polish Journal of Chemical Technology*, **20**, 2018, 39.
- [3] M. Mamaye, Z. Kiflie, S. Feleke, A. Yimam, *Sugar Tech*, **22**, 2020, 706.
- [4] J. Kaushal, S. Mehandia, G. Singh, A. Raina, S.K. Arya, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **16**, 2018, 192.
- [5] S. Fan, P.L. Burn, P.E. Shaw, *RSC Advances*, **9**, 2019, 7032.
- [6] B. Gokdere, A. Uzer, S. Durmazel, E. Ercag, R. Apak, *Talanta*, **202**, 2019, 402.
- [7] P.P. Ricci, O.J. Gregory, *IEEE Sensors Journal*, **20**, 2020, 14058.
- [8] S. Fan, J. Lai, P.L. Burn, P. Shaw, *ACS Sens*, **4**, 2019, 134.
- [9] Q. Chen, T. Lin, J. Huang, Y. Chen, L. Guo, F. Fu, *Analytical Methods*, **10**, 2018, 504.
- [10] W.Y. Ko, Y.S. Chen, M.S. Li, J.Y. Lai, K.J. Lin, *Electroanalysis*, **31**, 2019, 797.
- [11] M. Derbali, A. Othmani, S. Kouass, F. Touati, H. Dhaouadi, *Materials Research Bulletin*, **125**, 2020.
- [12] P. Paulraj, A. Umar, K. Rajendran, A. Manikandan, R. Kumar, E. Manikandan, K. Pandian, M.H. Mahnashi, M.A. Alsaiani, A.A. Ibrahim, N. Bouropoulos, S. Baskoutas, *Electrochimica Acta*, **363**, 2020.
- [13] F.H.A. Meira, S.F. Resende, D.S. Monteiro, M.C. Pereira, L.H.C. Mattoso, R.C. Faria, A.S. Afonso, *Electroanalysis*, **32**, 2020, 2231.
- [14] M. Mirzaei, M. Behboudnia, F. Kheiri, V.A. Chianeh, H. Naeim, E. Jannatdoust, M. Sirousazar, *Journal of the Electrochemical Society*, **166**, 2019, B1232.