فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی - ترویجی
سال چهارم، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۵، پاییز ۱۳۹۸
Vol. 4, No. 3, Issue No. 15
Autumn 2019, Quarterly
صفحه ۶۳ - ۵۵

Iran Polymer Technology: Research and Development

کاربرد پلی‌اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن در زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی

زهرا رحیم زاده، سید مرتضی نقیب*
تهران، دانشگاه علم و صنعت، گروه نانوفناوری

چکیده ...

با ظهور پلیمرهای رسانا پیشرفت‌ها در زمینه دستگاه‌های الکترونیک از قبیل دستگاه‌های زیست‌الکترونیک وارد مرحله جدیدی شد. ازجمله این دستگاه‌ها زیست‌حسگرها هستند که برای مصارف مختلفی ازجمله پزشکی و بررسی سلامت مواد غذایی استفاده می‌شوند. زیست‌حسگرها انواع مختلفی دارند؛ یکی از انواع مختلف آن‌ها زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی هستند که توانایی آن را دارند که بدون صدمه زدن به سامانه، ترکیبات آن را اندازه گیری کنند. در این مقاله به معرفی پلیمر پلی‌اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن، روش‌های ساخت و افزایش رسانایی آن پرداختیم. در ادامه سعی بر آن شد تا با معرفی اجمالی زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی، به پیشرفت‌های اخیر در مورد استفاده از پلیمر پلی-اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن در زیست‌حسگرها بپردازیم و چالش‌های باقی‌مانده در این زمینه را معرفی کنیم.

واژه‌های کلیدی:
پلی‌اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن
هدایت الکتریکی
جزء زیستی
زیست‌حسگر
الکتروشیمی

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
naghib@iust.ac.ir

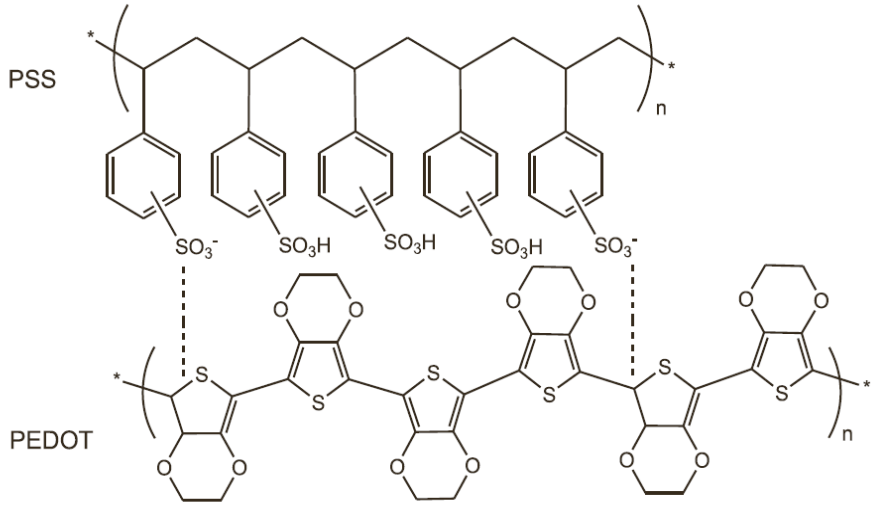
۱ مقدمه

پلیمرهای آلی رسانا چهارمین نسل پلیمرها هستند [۱]. توسعه پلیمرهای رسانا از زمانی شروع شد که شیراکاوا، مک‌دیارمید و هیگر در سال ۱۹۷۷ پلی‌استایلن (PA) را کشف کردند. اما دو مشکل اساسی پلی‌استایلن عبارت بود از: ناپایداری به‌علت تخریب اکسیدی و مشکل انجام فرایند با آن در آب. در میان پلیمرهای رسانا، پلی-آنیلین (PANi)، پلی‌پایرول (PPy) و پلی‌تیوفن (PTh) به‌علت پایداری بالا در محیط، بهتر بودن رسانایی الکتریکی و عملکرد الکتروشیمیایی نسبت به پلیمرهای دیگر بیشتر مورد توجه قرار دارند [۲]. PANi از شیمی غنی‌ای برخوردار است و همچنین می‌تواند با هزینه کم، اشکال رسانای مختلفی به خود بگیرد. اما امکان به وجود آمدن بخش‌هایی از بنزیدین در زنجیره ی اصلی PANi وجود دارد که این مسئله، خطر ساخته شدن محصولات سمی به هنگام تجزیه PANi را افزایش می‌دهد. PPy و PTh نسبت به PANi بی‌خطرتر و محیط زیست‌دوست‌تر شناخته می‌شوند اما در عین حال از مشکل غیرقابل حل بودن برخوردارند. PTh ای به نام پلی‌اتیلن دی‌اکسی‌تیوفن یا PEDOT در سال ۱۹۸۰ ساخته شد که رسانایی بیشتری نسبت به PPy و PANi و همچنین دیگر PTh ها از خود نشان داد. به‌علاوه با افزودن پلیمر آبدوستی به نام پلی‌استایرن‌سولفونات یا PSS به ساختار PEDOT مشکل غیرقابل حل بودن آن نیز برطرف شد [۱].

از طرف دیگر با توجه به نیاز روز افزون به شناسایی و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی و زیستی مختلف، حسگرهای الکتریکی به‌وجود آمدند [۳] زیست‌حسگرها برای کاربردهایی مانند پزشکی، بررسی سلامت غذایی و کاربردهای زیست‌محیطی استفاده می‌شوند [٤]. زیست‌حسگرها خود به پنج زیرگروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از: زیست-حسگرهای الکتروشیمیایی، زیست‌حسگرهای آشکارساز-گرمایی، زیست‌حسگرهای ترانزیستوری اثر میدانی حساس به یون، زیست‌حسگرهای نوری و زیست‌حسگرهای تشدیدی. در این میان زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی می‌توانند بدون آسیب رساندن به سامانه، آن را مورد بررسی قرار دهند [۳]. یکی از اجزای زیست‌حسگرها مولکول‌های زیستی مانند آنزیم‌ها، پادتن‌ها، سلول‌ها و ... هستند [٤]. در مورد زیست‌حسگرهایی که در آن‌ها از آنزیم استفاده می‌شود به‌علت ناپایداری آنزیم‌ها بر روی سطح مبدل، نیاز اساسی به تثبیت‌کننده‌ها وجود دارد. پلیمرهای رسانا یکی از مهم‌ترین موادی هستند که امروزه به این منظور استفاده می‌شوند و البته می‌توانند نقش‌های دیگری مانند مبدل یا گیرنده را نیز در زیست‌حسگرها به عهده بگیرند [۳و٤]. PEDOT به‌علت ویژگی‌های منحصربه‌فردش مانند سازوکار انتقال الکترون و پایداری به‌عنوان ماتریس برای تثبیت آنزیم‌ها بسیار مورد توجه قرار دارد [۵]. علاوه بر نقش ماتریسی، PEDOT می‌تواند حساسیت الکتروشیمیایی زیست‌حسگر را نیز بهبود دهد [٦]. در این مقاله سعی کرده‌ایم تا با معرفی بیشتر PEDOT، نقش آن در زیست‌حسگرها و تعدادی از پیشرفت‌های جدیدی که در زمینه استفاده از این پلیمر در زیست‌حسگرها گزارش شده است را به‌طوراجمالی جمع‌آوری کنیم.

۲ پلی‌اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن

همانطور که اشاره شد PANi، PPy و PTh پلیمرهای شناخته‌شده در میان پلیمرهای رسانا هستند که از ویژگی‌های بسیار مطلوبی مانند پایداری بالا، رسانایی خوب و عملکرد الکتروشیمیایی مطلوب در مقایسه با پلیمرهای رسانای دیگر برخوردارند. اما مقایسه میان این پلیمرها به‌علت سمی بودن PANi و حل‌ناپذیر بودن PPy این حقیقت مشخص شد که PTh خاصی به اسم PEDOT در میان پلیمرهای رسانا از شرایط مطلوب‌تری برخوردار است [۱]. PEDOT در واقع بهترین PTh در زمینه‌های پایداری فیزیکی و شیمیایی، رسانایی، شفافیت و همچنین زیست‌سازگاری است [۲و۷]. در پلیمرهای رسانا و نیز PEDOT اتم کربن دارای پیوند sp^2 و یک الکترون غیر جایگزیده با پیوند π است که باعث رسانایی آن‌هاست [۸][۹]. PEDOT اولیگومری با وزن مولکولی پایین است اما با ترکیب آن با مولکول‌های دیگر، تبدیل به پلیمر می‌شود. به‌علاوه برای محیط زیست‌دوست کردن آن، مولکول‌های دارای گروه سولفونات مانند PSS و پاراتولوئن سولفونات (Paratoluenesulfonate) را به آن اضافه می‌کنند [۱۰]. به‌علاوه بیشتر مواقع برای آب‌دوست شدن PEDOT آن را با PSS ترکیب می‌کنند؛ به‌طوری که امروزه پلیمر PEDOT:PSS حل‌پذیرترین ECP در آب است و همچنین این دست‌یافته امکان تجاری شدن و تولید انبوه را برای پلیمر PEDOT:PSS فراهم کرده است [۲]. البته PEDOT از PEDOT:PSS



شکل ۱ طرح‌واره ساختار پلیمر PEDOT:PSS [۱۲].

رساناتر است که برای بالا بردن رسانایی PEDOT:PSS در کاربردهای مختلف معمولاً به فرایند اصلاح ثانویه (Post-treatment) برای حذف PSS احتیاج داریم [۱۱]. در شکل ۱ طرح‌واره پلیمر PEDOT:PSS آورده شده است.

PEDOT:PSS را می‌توان به شکل‌های مختلفی سنتز کرد. ازجمله شکل‌های دو بعدی مانند فیلم‌ها و همچنین شکل‌های سه بعدی مانند اسفنج‌ها، هیدروژل‌ها و آیروژل‌ها [۱۱]. یکی از توانایی‌های جذاب، قابلیت ساخت فیلم‌های ایستاده از PEDOT:PSS است که انعطاف‌پذیر، برخوردار از فرایندپذیری آسان، شکل پذیری و قابلیت اصلاح با محلول‌ها در طول رشد فیلم بر روی زیرلایه هستند [۱۱][۱۳].

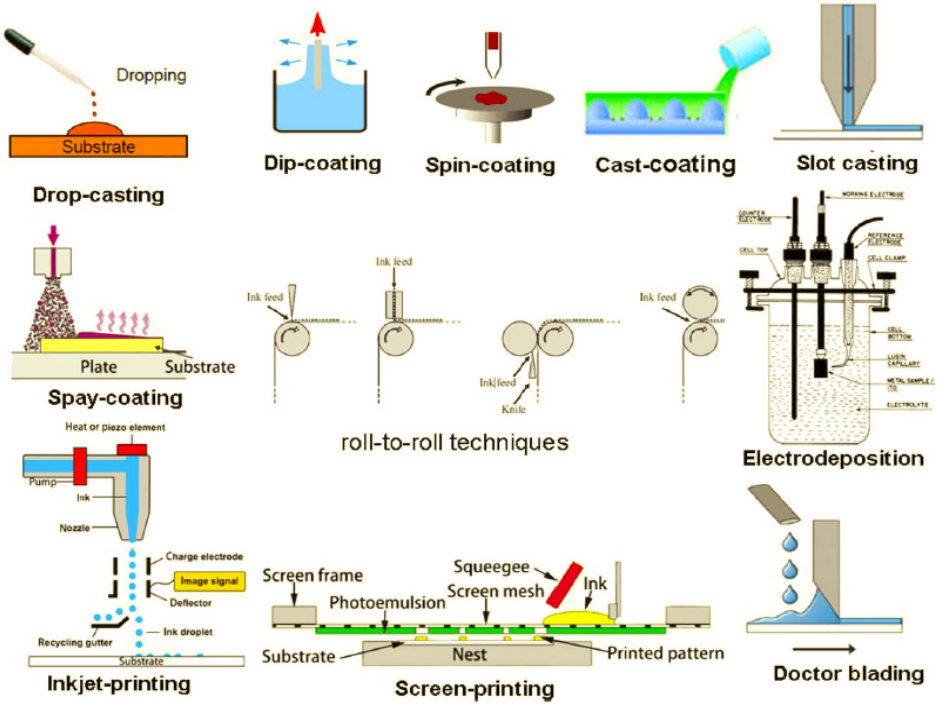
۳ سنتز پلی‌اتیلن دی‌اکسی‌تیوفن

روش‌های مختلفی برای سنتز پلیمرهای رسانا از جمله PEDOT وجود دارد. پلیمری شدن می‌تواند به سه صورت شیمیایی، الکتروشیمیایی و VPP (یا پلیمری شدن فاز بخار) صورت پذیرد [۹و۱۱]. به‌علاوه برای ساخت نانوساختارهای مورد نظر روش‌های متفاوتی وجود دارد که شامل روش‌های با قالب و روش‌های بدون قالب می‌شوند [۹]. روش‌های با قالب دو بخش قالب‌های سخت مانند نانوالیاف، ساختارهای متخلخل و نانوذرات کلوئیدی [٤] و قالب‌های نرم مانند میسل‌ها (که میسل‌ها را می‌توان از مواد فعال سطحی یا کلوئیدها،صابون، DNA، حباب‌ها و ... ساخت) [٤و۹] را شامل می‌شوند. همچنین پلیمری شدن در حضور مواد خاص یا تحت شرایط خاص را روش بدون قالب می‌گویند [۹].

در میان ساختارهای متفاوت، لایه‌های نازک از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند به‌این‌دلیل که به‌عنوان الکترود استفاده می‌شوند و الکترودها مهم‌ترین بخش دستگاه‌هایی مانند ابرخازن‌ها، دیودها، سلول‌های سوختی، حسگرها، باتری‌ها و ... هستند [۲]. روش‌های متفاوت ساخت لایه‌های نازک عبارتند از: پوشش‌دهی دورانی، پوشش‌دهی قطره‌ای، پوشش‌دهی غرقابی، پوشش‌دهی با ریخته‌گری، ریخته‌گری از طریق شکاف، روش‌های Roll-to-roll، پوشش‌دهی از طریق پاشش، Doctor Blading، پوشش‌دادن الکتریکی، رسوب‌دادن شیمیایی بخار، چاپ جوهر جت و چاپ سه‌بعدی [۲] [۱۱]. در شکل ۲ طرح‌واره این روش‌ها آورده شده است.

۴ افزایش رسانایی پلی‌اتیلن دی‌اکسی‌تیوفن

برای افزایش رسانایی لایه‌های PEDOT روش‌های متفاوتی انجام شده است: از جمله تغییر ضخامت، پیش‌فراوری کردن یا پس‌فراوری با محلول‌ها، بازفراوری با گرما یا تحت تابش نور فرابنفش قرار دادن [١٤]. از جمله محلول‌هایی که برای فراوری لایه‌های PEDOT استفاده شده‌اند عبارتند: از محلول آبی اتیلن گلیکول، محلول آبی دی-متیل سولفوکسید، متانول، اسیدها، مایعات یونی، مواد

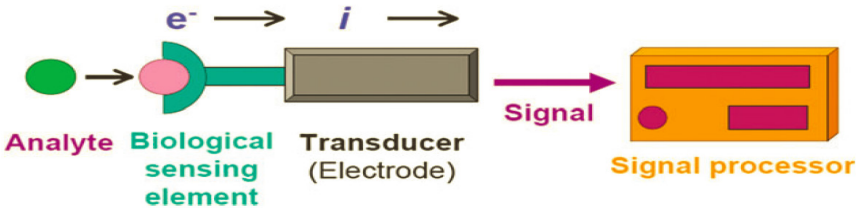


شکل ۲ طرح‌واره روش‌های ساخت لایه‌های نازک PEDOT:PSS [۲]

فعال سطحی، زویتریون و ... . همچنین ترکیب تعدادی از این روش‌ها نیز انجام شده اما نیاز به انجام روش‌های ترکیبی بیش‌تری وجود دارد [۱۵].

۵ زیست‌حسگرهای برپایه پلی‌اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن

همان‌طور که اشاره شد نیاز به مشاهده و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی و زیستی دلیل نیاز ما به زیست‌حسگرها است [۳]. در میان حسگرها، زیست‌حسگرها کاربردهای زیادی در زمینه‌های زیست‌محیطی، پزشکی و بررسی سلامت مواد غذایی دارند و معمولاً از مولکول زیستی متصل به مبدل تشکیل می‌شوند [٤]. این زیست‌مولکول باید قابلیت پیوند با مولکول مورد نظر را داشته باشد و حتی در محیط‌های خنثی نیز فعال الکتریکی باشد [۱٦]. زیست‌حسگرها خود به پنج زیرمجموعه تقسیم می‌شوند: زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی، زیست‌حسگرهای تشدیدی، زیست‌حسگرهای نوری، زیست‌حسگرهای حرارتی و زیست‌حسگرهای برپایه ترانزیستورهای اثر میدانی حساس به یون. در میان این گروه‌ها، زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی می‌توانند بدون آسیب رساندن به سامانه، گونه‌های مورد نظر را اندازه‌گیری کنند [۳]. در زیست‌حسگرها معمولاً از زیست‌مولکول‌هایی مثل آنزیم‌ها، پلی‌پپتیدها، پاد تن‌ها و ... استفاده می‌شود که این زیست‌مولکول‌ها باید بتوانند به‌صورت اختصاصی با عنصر مورد نظر پیوند تشکیل دهند [٤و۱٦] .در شکل ۳ طرح‌واره‌ای از زیست‌حسگرهای دارای زیست‌مولکول نمایش داده شده است. زیست‌حسگرهایی که در آن‌ها از آنزیم استفاده می‌شود با چالش پایداری آنزیم‌ها روبرو هستند که برای رفع این مشکل از روشی تحت عنوان تثبیت استفاده می‌شود. پلیمرهای رسانا از جمله موادی هستند که به‌علت ویژگی‌های منحصربه‌فردشان، برای تثبیت آنزیم‌ها استفاده می‌شوند [۳و٤]. راه‌های مختلفی برای تثبیت آنزیم‌ها وجود دارد مانند پیوند کووالانسی، جذب فیزیکی، فیلم‌های لانگمویر بلاجت، محبوس‌سازی، اتصالات عرضی، الکتروپلیمری شدن و تجمع لایه‌لایه، که از میان این روش‌ها، اتصالات عرضی، پیوند قوی پروتئین با سطح را فراهم می‌کند که البته همچنین ممکن است باعث کاهش فعالیت آنزیمی شود [۱۷]. علاوه بر این، پلیمرهای رسانا خود می‌توانند



شکل ۳ طرح‌واره زیست‌حسگرهای با مبدل الکتروشیمیایی [۱۸]

به‌عنوان مبدل و به جای آنزیم نیز استفاده شوند [٤]. در میان پلیمرهای رسانا، PEDOT به‌علت ویژگی‌های منحصربه‌فردش برای استفاده در زیست‌حسگرها بسیار مورد توجه قرار دارد؛ چند مورد از این ویژگی‌ها عبارتند از : فعالیت الکتریکی در بافر فسفاتی، سازوکار خاص انتقال الکترون و مناسب بودن به‌عنوان ماتریس برای تثبیت آنزیم‌ها [٥]. بنابراین از PEDOT به‌عنوان ماتریس برای تثبیت زیست‌مولکول‌ها و همچنین برای بهبود حساسیت الکتروشیمیایی زیست‌حسگر استفاده می‌شود [٦]. سازوکار عملکرد زیست‌حسگرها این است که مشخصه حسگرها مانند مقاومت یا رسانایی را پیش از قرار دادن الکترود در تماس با گونه مورد نظر و پس از قرار دادن، اندازه می‌گیرند. در نتیجه سطح ویژه الکترود بسیار اهمیت دارد و بر روی میزان حساسیت زیست‌حسگر تأثیرگذار است. به‌علاوه گفته می‌شود که هرچه سطح ویژه در دسترس الکترود بیشتر باشد می‌تواند باعث پاسخ سریع‌تر زیست‌حسگر شود [٤]. زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی بر اساس نحوه اندازه گیری، انواع مختلفی به شرح زیر دارند (شکل ۳):

• زیست‌حسگرهای هدایت‌سنجی: اساس کار این زیست‌حسگرها بر اساس اندازه‌گیری تغییر رسانایی در پلیمرهای رساناست که در نتیجه واکنش‌های اکسایش-کاهش، تغییرات ساختاری (Conformational) و دوپه شدن یا وادوپه شدن (Dedoping) در طول تماس با عنصر مورد نظر رخ می‌دهد [٤].

• زیست‌حسگرهای ولتامتری: وادوپه و دوپه کردن و واکنش‌های اکسایش-کاهش همچنین می‌توانند باعث تغییر پتانسیل سامانه شوند که این تغییر قابل اندازه‌گیری است [٤].

• زیست‌حسگرهای ولتامتری/آمپرومتری: در این زیست‌حسگرها به الکترود، پتانسیل داده می‌شود و جریان را اندازه‌گیری می‌کنند. واکنش‌های الکتروشیمیایی اکسایش-کاهش در سطح الکترودها منشأ ایجاد این جریان الکتریکی است [۱۸].

شکل‌های مختلفی از پلیمرهای رسانا از جمله PEDOT را می‌توان در زیست‌حسگرها به کار گرفت از جمله: لایه‌های نازک، نانوذرات، نانوآرایه‌ها (Nano Array) و نانوساختارهای نشانی‌پذیر (Addressable). در مورد لایه‌های نازک چند مشخصه تأثیرگذار است مانند ضخامت، ساختار سطح و تخلخل‌ها. گفته شده است که کم‌تر شدن ضخامت نانولایه‌ها، سریع‌تر شدن زمان پاسخ‌دهی و بیش‌تر شدن حساسیت زیست‌حسگرها را در پی داشته است. البته مشاهده شده که درمورد لایه‌های میکرومتخلخل، تغییر ضخامت لایه‌های ساخته شده از نانوالیاف تأثیر زیادی در تغییر زمان پاسخ زیست‌حسگر نداشته است. همچنین دیده شده که افزایش زبری سطح به‌علت افزایش سطح، بهبود عملکرد زیست‌حسگر را نتیجه می‌دهد [٤]. در زمینه استفاده از PEDOT در زیست‌حسگرها، مشکل کمبود عامل زیستی در PEDOT استفاده آن را در دستگاه‌های زیست‌الکترونیکی محدود کرده است [۱۹]. برای افزایش گزینش‌پذیری زیست‌حسگرها و حذف اثر عوامل مزاحم، استفاده از روش MIP (Molecularly Imprinted Polymers) روشی موثر است؛ چرا که این روش ساختار گیرنده‌های زیست‌حسگر را به‌نحوی مصنوعی سنتز می‌کند که پایداری و قابلیت گزینش بالایی داراست [٦و۲۰]. تنها مشکل این روش، اتصال پلیمرهای دارای اتصالات عرضی زیاد به مبدل‌هاست که با استفاده از PEDOT این مشکل تا حدی برطرف شده است [٦].

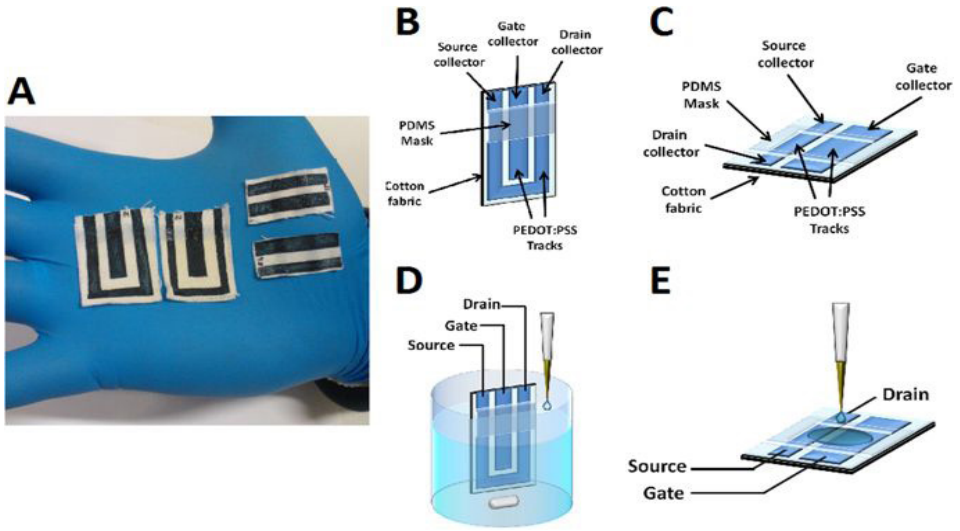
تاکنون زیست‌حسگرهای الکتروشیمیایی زیادی بر پایه

PEDOT ساخته شده‌اند؛ ازجمله زیست‌حسگرهایی برای اندازه‌گیری: نمک اسید گلوتامیک، Acetylcholinesterase، گلوکز، DNA، فاکتور رشد اندوتلیال رگی، ترکیبات فنولیک، بررسی چسبندگی سلولی، ریبوفلاوین، دوپامین و آنتی ژن Carcinoembryonic .

نوعی از زیست‌حسگرها، زیست‌حسگرهای بی‌آسیب یا پوشیدنی هستند که در آن‌ها از عرق، بزاق دهان یا اشک به‌جای نمونه‌های خونی استفاده می‌شود. در این زمینه نیز کامپوزیت‌های PEDOT به‌علت دارا بودن خاصیت انعطاف‌پذیری می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [٦]. به‌تازگی زیست‌حسگری پوشیدنی بر پایه پارچه و PEDOT ساخته شده است و گفته شده که این زیست‌حسگر از حساسیت بیشتری نسبت به زیست‌حسگر بر پایه شیشه و PEDOT نسبت به دوپامین، آسکوربیک‌اسید و آدرنالین برخوردار است [٢١]. زیست‌حسگر تیروزین نیز یکی دیگر از زیست حسگرهای پوشیدنی بر پایه PEDOT است که توسط Battista و همکارانش ساخته شده است [٢٢]. شکل ٤ دو نوع زیست‌حسگر ساخته شده با استفاده از پارچه و PEDOT را نشان می‌دهد.

همچنین زیست‌حسگرهای بی‌سیم و کنترل از راه دور نیز به تازگی در دست بررسی و ساخت است [٦]. برای نمونه، زیست‌حسگر گلوکز به تازگی در این زمینه ساخته شده است که در آن الکترود کار از گلوکز اکسیداز، لایه PEDOT و الکترود طلا/پلی‌اتیلن ترفتالات تشکیل شده است. این دستگاه حساسیتی برابر با ٩/٢٤ $\mu A/(mM \cdot cm^2)$ از خود نشان داده است [١٧]. همچنین زیست‌حسگری که در آن از PEDOT برای اندازه‌گیری ضربان قلب در مچ و گردن استفاده شد، توسط Sekine و همکاران ساخته شد [٢٣]. به‌علاوه به‌تازگی در این زمینه زیست‌حسگری نیز برای اندازه‌گیری لاکتات موجود در عرق تولید شده است [٢٤].

علاوه بر زیست‌حسگرهای فوق، زیست‌حسگرهای بدون برچسب (Label-free) نیز وجود دارند که زمانی استفاده می‌شوند که برچسب‌دار کردن بسیار سخت است و یا امکان آن وجود ندارد و همچنین زمانی که برچسب‌دار کردن، مکان‌های مهم را برای پیوند برقرار کردن با عنصر اشغال می‌کند. در نتیجه گاهی نیاز به این زیست‌حسگرها وجود دارد. در این زیست‌حسگرها همچنین امکان مشاهده هم‌زمان نتایج سامانه نیز وجود دارد. تحقیقات کمی بر روی زیست‌حسگرهای بدون برچسب بر پایه PEDOT انجام شده است [٢٥و٢٦]. برای مثال زیست‌حسگری با استفاده از PEDOT:PSS و نانوذرات اکسیدآهن، بر پایه کاغذ رسانای واتمن ساخته



شکل ٤ تصویر دو نوع زیست‌حسگر ساخته شده با استفاده از پارچه و PEDOT (تصویر B و D نوعی که داخل محلول گذاشته می‌شود و تصویر C و E نوع پوشیدنی این زیست‌حسگر که با میزان الکترولیت کم کار می‌کند.) [٢١].

شـد کـه بـرای اندازه‌گیـری آنتـی‌ژن Carcinoembryonic در سـلول‌های سـرطانی حساسـیتی به انـدازه $10/2\ \mu Ang^{-1}mLcm^{-2}$ در بـازه خطـی $25-4\ ngmL^{-1}$ نشـان داد [۲۷]. زیست‌حسـگرهای بـدون برچسـب دیگـری نیـز بـا اسـتفاده از PEDOT سـاخته شـده‌اند؛ از جملـه زیست‌حسـگرهای DNA [۲۸] و گلوکـز [۲۹].

۶ چالش‌ها

بـا وجـود پیشـرفت‌های بسـیار در زمینـه اسـتفاده از پلیمـر PEDOT در زیست‌حسـگرهای الکتروشـیمیایی همچنـان کاسـتی‌هایی در ایـن زمینـه وجـود دارد. در ادامـه، چالش‌های موجـود در ایـن زمینـه معرفـی شـده‌اند:

• نیـاز بـه توسـعه بیشـتر آزمایش‌هـا در زمینـه سـاخت زیست‌حسـگرهای پوشـیدنی و همچنیـن زیست-حسـگرهای کنتـرل از راه دور.

• نیـاز بـه بررسـی روش‌هـای ترکیبـی افزایـش رسـانایی PEDOT.

• نیـاز به توسـعه مواد به‌منظور سـاخت زیست‌حسـگرهایی کـه هم‌زمـان دارای حساسـیت بـالا، گزینش‌پذیـری بـالا، حـد آشکارسـازی پاییـن و بـازه خطـی وسـیع باشـد.

• نیـاز بـه آزمایش‌هـای بیشـتر بـر روی زیست‌حسـگرهای برپایـه نانوالیـاف و نانوسـیم‌های PEDOT. گفتـه می‌شـود کـه نانوالیـاف به‌علـت طبیعـت قابـل حمـل، انعطاف‌پذیـری و تخلخـل بـالا امـروزه بسـیار مـورد توجـه قـرار گرفته‌انـد. امـا آزمایش‌هـای کمـی بـر روی زیست‌حسـگرهای بـر پایـه نانوالیـاف PEDOT انجـام گرفتـه اسـت [۵].

• نیـاز بـه آزمایش‌های بیش‌تـر در زمینه زیست‌حسـگرهای بدون برچسـب برپایـه PEDOT.

• همچنیـن یکـی از چالش‌هـای مطرح‌شـده در زمینـه PEDOT چالـش چسـباندن آن بـر روی الکتـرود و عـدم پایـداری آن در آب بـرای زمان‌هـای طولانـی اسـت [۲].

۷ نتیجه‌گیری

بـا توجـه بـه نیـاز روز افـزون بـه اندازه‌گیـری ترکیبـات شـیمیایی و زیسـتی موجـود در مـواد غذایـی و بـدن جانداران، سـاخت و توسـعه زیست‌حسـگرها از نیازهـای حیاتـی محسـوب می‌شـود. در زیست‌حسـگرهای الکتروشـیمیایی بـرای تثبیـت زیسـت‌مولکول‌ها به‌خصـوص آنزیم‌هـا بر روی الکتـرود، نیـاز بـه روش‌هـای تثبیـت مناسـب وجـود دارد کـه از جملـه مـواد تثبیت‌کننـده مهـم، پلیمرهای رسـانا هسـتند. در میـان پلیمرهـای رسـانا، پلیمـر PEDOT به‌علـت ویژگی‌هـای منحصربه‌فـردی کـه داراسـت بسـیار مـورد توجـه قـرار دارد و از ایـن رو در ایـن مقالـه سـعی شـد تـا بـا معرفـی پلیمـر PEDOT و زیست‌حسـگرهای الکتروشـیمیایی، پیشـرفت‌های اخیـر در زمینـه اسـتفاده از ایـن پلیمـر در زیست‌حسـگرها را ذکـر کـرده، بـه معرفـی چالش‌هـای باقی‌مانـده بپردازیـم. امیـد اسـت تـا بـا برطـرف کـردن ایـن کاسـتی‌ها و چالش‌هـا، بشـر بـه موفقیت‌هـای روزافـزون در ایـن زمینـه دسـت یابـد.

مراجع

1. Wei W., Wang H., Hu Y. H., "A Review on PEDOT-based Counter Electrodes for Dye-sensitized Solar Cells," *Int. J. Energy Res.,* 38, 1099–1111, **2014**.

2. Wen Y. , Xu J., "Scientific Importance of Water-processable PEDOT–PSS and Preparation, Challenge and New Application in Sensors of its Film Electrode: A Review," *J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem.*, 55, 121–1150, **2017**.

3. Naseri M., Fotouhi L., Ehsani A., "Recent Progress in the Development of Conducting Polymer-based Nanocomposites for Electrochemical Biosensors Applications: A Mini-review," *Chem. Rec*., 18, 599–618, **2018**.

4. Xia L., Wei Z.,Wan M., "Conducting Polymer Nanostructures and Their Application in Biosensors," *J. Colloid Interface Sci*., 341, 1–11, **2010**.

5. Çetin M. Z., Camurlu P., "An Amperometric Glucose Biosensor Based on PEDOT Nanofibers," *RSC Adv*., 8, 19724–19731, **2018**.

6. Hui Y., Bian C., Xia S., Tong J., Wang J., "Synthesis and Electrochemical Sensing Application of Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)-based Materials: A Review," *Anal. Chim. Acta,* **2018**.

7. Balint R., Cassidy N. J., Cartmell S. H., "Conductive Polymers: Towards a Smart Biomaterial for Tissue Engineering," *Acta Biomater*., 10, 2341–2353, **2014**.

8. Green R., Abidian M. R., "Conducting Polymers for Neural Prosthetic and Neural Interface Applications," *Adv. Mater*., 27, 7620–7637, **2015**.

9. Abdelhamid M. E., O'Mullane A. P., Snook G. A., "Storing Energy in Plastics: A Review on Conducting Polymers & Their Role in Electrochemical Energy Storage," *Rsc Adv*., 5, 11611–11626, **2015**.

10. Carli S., "A New Drug Delivery System Based on Tauroursodeoxycholic Acid and PEDOT," *Chem. Eur. J.*, **2018**.

11. Zhao Z., Richardson G. F., Meng Q., Zhu S., Kuan H.-C., Ma J., "PEDOT-based Composites as Electrode Materials for Supercapacitors," *Nanotechnology*, 27, 42001, **2015**.

12. Pires F., Ferreira Q., Rodrigues C. A. V, Morgado J., Ferreira F. C., "Neural Stem Cell Differentiation by Electrical Stimulation Using a Cross-linked PEDOT Substrate: Expanding the Use of Biocompatible Conjugated Conductive Polymers for Neural Tissue Engineering," *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-General Subj*., 1850, 1158–1168, **2015**.

13. Levermore P. A., Jin R., Wang X., Chen L., Bradley D. D. C., De Mello J. C., "High Efficiency Organic Light-emitting Diodes with PEDOT-based Conducting Polymer Anodes," *J. Mater. Chem*., 18, 4414–4420, **2008**.

14. Eom S. H., "Polymer Solar Cells Based on Inkjet-printed PEDOT: PSS Layer," *Org. Electron*., 10, 536–542, **2009**.

15. Zhu Y. , "Ag-Doped PEDOT: PSS/CNT Composites for Thin-film All-solid-state Supercapacitors with a Stretchability of 480%," *J. Mater. Chem.* A, 6, 941–947, **2018**.

16. Ates M., "A Review Study of (bio) Sensor Systems Based on Conducting Polymers," *Mater. Sci. Eng. C,* 33, 1853–1859, **2013**.

17. Aleeva Y., "Amperometric Biosensor and Front-end Electronics for Remote Glucose Monitoring by Crosslinked PEDOT-glucose Oxidase," *IEEE Sens. J.*, 18, 4869–4878, **2018**.

18. Ronkainen N. J., Halsall H. B., Heineman W. R., "Electrochemical Biosensors," Chem. Soc. Rev., 39, 1747–1763, 2010.

19. Mantione D., del Agua I., Sanchez-Sanchez A., Mecerreyes D., "Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT) Derivatives: Innovative Conductive Polymers for Bioelectronics," *Polymers.*, 9, 354, **2017**.

20. de J., Neto R. M., de W., Santos J. R., Lima P. R., Tanaka S. M. C. N., Tanaka A. A., Kubota L. T., "A Hemin-based Molecularly Imprinted Polymer (MIP) Grafted Onto a Glassy Carbon Electrode as a Selective Sensor for 4-aminophenol Amperometric," *Sensor. Actuat. B-Chem.*, 152, 220–225, **2011**.

21. Gualandi I., Marzocchi M., Achilli A., Cavedale D., Bonfiglio A., Fraboni B., "Textile O0rganic Electrochemical Transistors as a Platform for Wearable Biosensors," *Sci. Rep., 6,* 33637, **2016**.

22. Battista E., "Enzymatic Sensing with Laccase-functionalized Textile Organic Biosensors," *Org. Electron*., 40, 51–57, **2017**.

23. Sekine T., "Fully Printed Wearable Vital Sensor for Human Pulse Rate Monitoring Using Ferroelectric Polymer," *Sci. Rep*., 8, 4442, **2018**.

24. Currano L. J., Sage F. C., Hagedon M., Hamilton L., Patrone J., K.Gerasopoulos, "Wearable Sensor System for Detection of Lactate in Sweat," *Sci. Rep*., 8, 15890, **2018**.

25. Schmitt K., Schirmer B., Hoffmann C., Brandenburg A., Meyrueis P., "Interferometric Biosensor Based on Planar Optical Waveguide Sensor Chips for Label-free Detection of Surface Bound Bioreactions," *Biosens. Bioelectron.*, 22, 2591–2597, **2007**.

26. Guo X., "Label-free and Sensitive Sialic Acid Biosensor Based on Organic Electrochemical Transistors," *Sensor. Actuat. B-Chem.,* 240, 1075–1082, **2017**.
27. Kumar S., "Electrochemical Paper Based Cancer Biosensor Using Iron Oxide Nanoparticles Decorated PEDOT: PSS," *Anal. Chim. Acta,* **2019**.
28. Galán T., "Label-free Electrochemical DNA Sensor Using 'Click'-functionalized PEDOT Electrodes," *Biosens. Bioelectron*., 74, 751–756, **2015**.
29. David M., Barsan M. M., Brett C. M. A., Florescu M., "Improved Glucose Label-free Biosensor with Layer-by-layer Architecture and Conducting Polymer Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)," *Sensor. Actuat. B-Chem*., 255, 3227–3234, **2018**.