

Polymerization
Quarterly, 2026
Volume 15, Number 4
Pages 31-39
ISSN: 2252-0449

A Comprehensive Review of the Performance and Properties of Conductive Polymers with a Focus on Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Polystyrene Sulfonate (PEDOT:PSS)

Mohammadreza Shams and Aliakbar Yousefi*

Department of Plastic Engineering, Faculty of Polymer Processing, Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 28 April 2025, Accepted: 21 November 2025

Abstract

Conducting polymers, as the fourth generation of polymeric materials with outstanding electrical properties and charge transport capabilities, have found a unique place in scientific research and industrial applications. These polymers generally have lower conductivity than metals, however the doping process significantly increases their conductive performance. Their electrical conductivity stems primarily from conjugated π -bonding systems within polymer backbones, facilitating efficient charge carrier mobility. Among the various types of conducting polymers, poly(4,3-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) offers excellent mechanical strength, superior performance, and remarkable environmental stability due to its aqueous dispersibility and the formation of stable and uniform films. These properties make PEDOT:PSS an optimal choice for applications requiring long-term electrical stability and mechanical flexibility. In this paper, the charge transport mechanisms, synthesis methods, and the effect of doping on improving the properties of PEDOT:PSS are reviewed. Data analysis of the presented results evidences superior conductivity of PEDOT:PSS even at ultrathin film thicknesses and its ability to maintain electrical stability under diverse environmental stressors. The synergy of superior electrical properties, chemical stability, and high adaptability has made PEDOT:PS a leading conductive polymer and essential for advancing next-generation flexible electronics and electronic materials.

Key Words

conductive polymer,
poly(3,4-ethylenedioxythiophene):
poly(styrene sulfonate),
conductivity,
stability,
doping

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: a.yousefi@ippi.ac.ir

مروری جامع بر عملکرد و خواص پلیمرهای رسانا با تمرکز بر پلی (۳،۴-اتیلن دی اکسی تیوفن): پلی (استیرن سولفونات) (PEDOT:PSS)

محمدرضا شمس و علی اکبر یوسفی*

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه پلاستیک، صندوق پستی ۱۴۹۷۵-۱۱۲

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۳۰

پلیمرهای رسانا به عنوان نسل چهارم مواد پلیمری با خواص الکتریکی برجسته و قابلیت انتقال بار الکتریکی، جایگاه منحصر به فردی در پژوهش‌های علمی و کاربردهای صنعتی یافته‌اند. این پلیمرها عموماً رسانندگی کمتری نسبت به فلزات دارند، اما فرایند دوپه کردن موجب افزایش چشمگیر رسانندگی آن‌ها می‌شود. رسانندگی الکتریکی در این پلیمرها عمدتاً ناشی از ساختار مزدوج پیوندهای π در زنجیر پلیمری است که امکان جابه‌جایی الکترون و حامل‌های بار را آسان می‌سازد. در میان انواع مختلف پلیمرهای رسانا، پلی (۳،۴-اتیلن دی اکسی تیوفن): پلی (استیرن سولفونات) (PEDOT:PSS) به دلیل پراکنش‌پذیری آبی و ایجاد فیلم‌های پایدار و یکنواخت، مقاومت مکانیکی عالی، عملکرد برتر و پایداری محیطی درخور توجهی را ارائه می‌کند. این ویژگی‌ها، PEDOT:PSS را به گزینه‌ی بهینه‌ای برای کاربردهای نیازمند پایداری الکتریکی بلندمدت و انعطاف‌پذیری مکانیکی تبدیل کرده است. در این مقاله سازوکارهای انتقال بار، روش‌های سنتز و اثر دوپه کردن بر بهبود خواص PEDOT:PSS مرور می‌شود. تحلیل داده‌های ارائه شده نشان می‌دهد، فیلم نازک این پلیمر رسانندگی بیشتری نسبت به سایر پلیمرها دارد و قابلیت آن در پایداری رسانندگی در برابر شرایط محیطی متغیر به اثبات رسیده است. هم‌افزایی خواص الکتریکی برتر، پایداری شیمیایی و انطباق‌پذیری زیاد، PEDOT:PSS را به پلیمر رسانای پیشرو و کلیدی در توسعه فناوری‌های نوین الکترونیک و مواد انعطاف‌پذیر تبدیل کرده است.

بسیار

فصلنامه علمی

سال پانزدهم، شماره ۴،

صفحه ۳۹-۳۱، ۱۴۰۴

ISSN: 2252-0449

چکیده



محمدرضا شمس



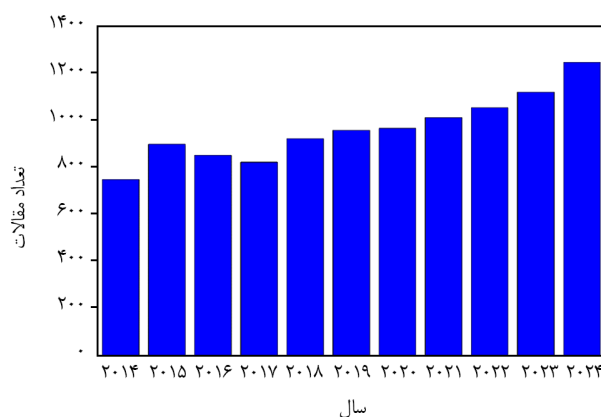
علی اکبر یوسفی

واژگان کلیدی

پلیمر رسانا،
پلی (۳،۴-اتیلن
دی اکسی تیوفن): پلی (استیرن
سولفونات)،
رسانندگی،
پایداری،
دوپه کردن

مقدمه

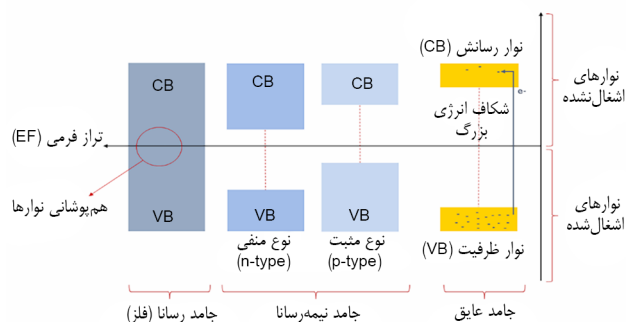
پلیمرها درشت مولکول‌های هیدروکربنی هستند که از تکرار واحدهای مونومری تشکیل شده‌اند. این تکرارها زنجیرهای بلند و ممتد ایجاد می‌کنند. در زندگی روزمره، پلیمرها عمدتاً با کاربردهایی همچون ظروف یک‌بار مصرف، بطری‌های نوشیدنی، عایق‌های گرمایی و ضداحتراق و همچنین عایق‌های الکتریکی شناخته می‌شوند [۱]. اغلب تصور نمی‌شود که این مواد امکان ایجاد خواص ترموالکتریکی و رسانش ذاتی را داشته باشند. پلیمرهای رسانا از نسل چهارم پلیمرها شناخته شده و جزء پلیمرهای هوشمند محسوب می‌شوند. پلیمرهایی که خاصیت رسانش ذاتی ندارند را نیز می‌توان با افزودنی‌هایی چون گرافن و نانولوله‌های کربن به مواد رسانا تبدیل کرد. همچنین می‌توان با استفاده از خواص ذاتی و ساختاری پلیمرها به این رسانندگی دست یافت، مانند پلیمرهای دارای حلقه آروماتیک با سامانه پیوندهای مزدوج- π که با ایجاد رادیکال‌های یونی امکان انتقال الکترون را دارند. برای پایداری پیوند دوگانه مزدوج- π به دلیل ضعیف بودن آن نسبت به پیوند دوگانه- σ ، باید بین تک‌پیوندهای اطراف حرکت کند تا انرژی پیوندها را پایدار کند. این کار با حرکت پیوند دوگانه میان سایر پیوندها، به عنوان حامل بار عمل می‌کند و بدین ترتیب یکی از شرایط رسانش یک پلیمر فراهم می‌شود [۲]. پلی(۳،۴-اتیلن‌دی‌اکسی تیوفن): پلی(استیرن سولفونات) (PEDOT:PSS) در میان پلیمرهای رسانا با خواص مشابه از برترین آن‌ها به‌شمار می‌رود. اهمیت این پلیمر در روند پژوهش‌های دهه اخیر طبق شکل ۱ دیده می‌شود. در این مقاله مروری بر پلیمرهای رسانا، سازوکار انتقال بار، روش‌های پلیمرشدن، راهکارهای بهبود عملکرد این پلیمرها پس از پلیمرشدن و در نهایت پلیمری که توجه ویژه‌ای را به خود در دنیای صنعت و پژوهش جلب کرده است یعنی PEDOT:PSS، خواهیم داشت.



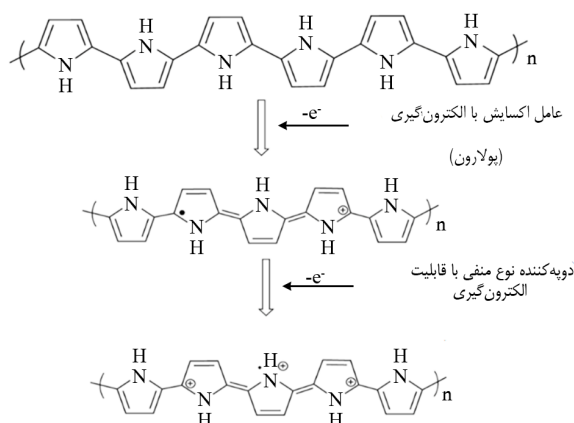
شکل ۱- تعداد مقالات مرتبط با PEDOT:PSS در دهه اخیر [۳].

خواص الکتریکی پلیمرها

برای شناخت عملکرد این مواد، نظریه‌های متفاوتی وجود دارد که بیشتر آن‌ها به انتقال بار و الکترون از طریق شکاف نوار اشاره دارند. همان‌طور که گفته شد، پیوندهای دوگانه مزدوج- π باعث جابه‌جایی بار الکتریکی هستند، اما Nasajpor و همکاران طی بررسی خود نشان دادند، این موضوع برای توجیه رسانش پلیمرهای رسانا، ناکافی است و علت اصلی رسانش را در شکاف نوار انرژی دانستند [۲]. براساس این نظریه، الکترون‌ها در موقعیت‌های بسیار پایدار قرار دارند که به شکل‌گیری شکاف نوار انرژی منجر می‌شوند. این شکاف، فاصله بین نوار ظرفیت و نوار رسانش را نشان می‌دهد. در صورتی که انرژی این شکاف برابر 0 eV باشد، ماده به‌طور کامل فلزی و رساناست. زیرا تمام الکترون‌ها آزاد بوده و تراز فرمی (EF) پر شده است. به‌طور کلی، تراز فرمی بالاترین سطح انرژی قابل اشغال در یک جامد را نشان می‌دهد [۳]. در ترموالکتریک و مکانیک کوانتومی، فرض بر این است که در جامدات نیمه‌رسانا، بالاترین تراز انرژی قابل اشغال با الکترون بین نوار ظرفیت و نوار رسانش قرار دارد. اندازه شکاف نوار انرژی، معیار اصلی تعیین رفتار الکتریکی ماده است؛ به گونه‌ای که شکاف‌های بین $0/1\text{ eV}$ تا 3 eV بیانگر رفتار نیمه‌رسانا و شکاف‌های بزرگ‌تر از $3/3\text{ eV}$ نشانگر ویژگی‌های عایقی ماده هستند. براین اساس، جامدات از نظر رسانایی به سه دسته کلی رسانا (فلزی)، نیمه‌رسانا و عایق تقسیم می‌شوند. در شکل ۲، نموداری از این نظریه ارائه شده است. براساس نظریه دیگری، خواص الکتریکی نیمه‌رساناها، که شامل پلیمرهای رسانا نیز می‌شوند، از سازوکارهای مختلف به دست می‌آیند. به‌طور ویژه، سولیتون‌ها یا جزایر بار در ساختارهای حلقه‌گشا و حالت پایه هم‌تراز (degenerate ground state) و پولارون و بی‌پولارون در ساختارهای حلقه‌ای، نقش اصلی را در انتقال و جابه‌جایی بار الکتریکی در این پلیمرها ایفا می‌کنند.



شکل ۲- نمایی از نظریه نوار انرژی [۲].



شکل ۳- فرایند پولارون و بی پولارون برای رسانش پلی پیرول [۵].

به دست آوردن مقاومت سطح است. در این روش، نقاط آلیاژی و پوشش یافته با طلای دستگاه که با فاصله های یکسان و مشخص هستند، بر سطح فیلم نازک پلیمر تهیه شده قرار می گیرند. سپس با اندازه گیری عبورپذیری جریان و اختلاف ولتاژ از نقاط دستگاه، طبق معادله (۱) مقدار مقاومت سطح نشان داده می شود:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

که در آن، R_s مقاومت سطحی ($\Omega \cdot m$) و V و I به ترتیب ولتاژ و جریان هستند. سمت چپ ضرب یک پارامتر عددی ثابت برابر $4/53236$ است. پس خواهیم داشت:

$$R_s = 4.53236 \frac{\Delta V}{I} \quad (1-1)$$

پس از به دست آمدن مقدار مقاومت سطحی از طریق محاسبات نرم افزار دستگاه، داریم:

$$\rho = R_s t_f \quad (2)$$

ρ نشانگر مقاومت ویژه ($\Omega \cdot cm$) و t_f نشانگر ضخامت فیلم (cm) است. در فرمول رسانندگی داریم:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

σ رسانندگی ($S \cdot cm^{-1}$) است. حال با ترکیب معادله های (۲) و (۳) خواهیم داشت و:

در سولیتون ها با استفاده از اوربیتال خالی و تبدیل هیبرید شدن sp^2 به sp ، یعنی رخداد شکست پیوند یا حلقه گشایی در پیوندهای مزدوج- π قابلیت انتقال ایجاد می شود. در حالت پولارون ها و بی پولارون ها، ساختارها به شکل حلقه ای یا کینوئیدی ظاهر می شوند. با اکسایش ساختار، معمولاً یک رادیکال باردار مثبت ایجاد می شود، به گونه ای که یک بخش باردار در کنار یک رادیکال آزاد قرار می گیرد. بار آزاد شده می تواند منفی یا مثبت باشد و رادیکال شکل گرفته را آنیونی یا کاتیونی می کند. در این نیمه رساناها، عامل های انتقال مثبت و منفی به ترتیب به عنوان عامل های انتقال حفره و الکترون شناخته می شوند. هنگامی که دو پولارون در مجاورت یکدیگر قرار گیرند، بار ایجاد شده ساختار را به سمت نوار رسانش هدایت می کند و انتقال بار و رسانایی رخ می دهد. با پیشرفت اکسایش یا استفاده از دوپه کننده ای که الکترون اضافه را جذب می کند و موجب کم شدن یک الکترون از زنجیر یا رادیکال می شود، حالت بی پولارون شکل می گیرد. بی پولارون نسبت به دو پولارون مجاور، خواص ترموالکتریکی بهتری را ارائه می دهد و رسانندگی بیشتری دارد. پولارون دارای یک بار الکتریکی همراه با چرخش مشابه الکترون است، در حالی که بی پولارون فاقد چنین چرخشی است. این ویژگی در رسانش برخی پلیمرها مفید و در برخی دیگر نامطلوب است [۱، ۴، ۵]. در ادامه، باید به اثر دوپه شدن بر رسانندگی پلیمرها توجه شود. با وجود الکترون های متحرک در ساختار پیوندهای مزدوج- π ، بخش هایی از پلیمرهای رسانا همچنان دارای رادیکال های خنثی هستند. با گرفتن یا دادن الکترون به این ساختار، امکان جابه جایی و انتقال بار در سراسر زنجیر پلیمر فراهم می شود. این فرایند عمدتاً با دوپه کننده ها تسهیل می شود. دوپه کننده ها موادی هستند که با افزودن آن ها به ساختار پلیمری، می توانند الکترون جذب کرده و بار مثبت را در بخش هایی از پلیمر ایجاد کنند که هنوز رادیکال دارند و باردار نیستند. همچنین، در پلیمرهای رسانای نوع منفی، دوپه کننده می تواند با دادن الکترون، رادیکال های خنثی را باردار کند و قابلیت جابه جایی الکترون را فراهم سازد. به دوپه کننده ای که الکترون می گیرد، الکترون پذیرنده و به دوپه کننده ای که الکترون می دهد، الکترون دهنده گفته می شود [۶، ۷]. روند دوپه شدن یک پلیمر نوع مثبت با دوپه کننده نوع منفی در شکل ۳ نشان داده شده است.

اندازه گیری رسانندگی پلیمرهای رسانا

اندازه گیری رسانندگی روش های مختلف دارد، اما یکی از بهترین آن ها استفاده از دستگاه مقاومت سنج چهارنقطه ای برای

$$\sigma = \frac{1}{R_s t_f} \quad (4)$$

بدین ترتیب مقدار رسانندگی به دست می‌آید [۸]. اندازه ضخامت اهمیت بسیار زیادی دارد، چراکه هر قدر اندازه ضخامت افزایش یابد، مقدار رسانندگی نیز افزایش چشمگیری می‌یابد. بنابراین، اعلام اندازه ضخامت لایه فیلم ماده رسانا از اهمیت زیادی برخوردار است.

انواع پلیمرهای رسانا و کاربردهای آن‌ها

همان‌طور که گفته شد، پلیمرهای رسانا از نظر ساختار به دسته‌های خطی و حلقوی آروماتیک تقسیم شده‌اند. از میان پلیمرهای رسانای شناخته‌شده با ساختار خطی می‌توان پلی‌استیلن (PA) و برای ساختارهای با زنجیر اصلی حلقه آروماتیکی می‌توان پلی‌آنیلین (PANI)، پلی‌پیرول (PPy)، پلی‌پارافینیلین وینیلین (PPV) و پلی‌تیوفن (PT) را نام برد [۹].

سنتز پلیمرهای رسانا

ساخت پلیمرها از طریق پلیمرشدن‌های افزایشی، تراکمی و یونی امکان‌پذیر است. روش‌های شناخته‌شده برای سنتز پلیمرهای رسانا (پلیمرهای مزدوج)، پلیمرشدن الکتروشیمیایی، سنتز شیمیایی اکسایشی، سنتز نوروشیمیایی و پلیمرشدن فاز بخار هستند که کاربردی‌ترین روش از میان آن‌ها، سنتز شیمیایی اکسایشی است. چرا که دستیابی به تنظیم رسانندگی نهایی پلیمر از این طریق راحت‌تر و از طرفی برای ساخت پیوند مزدوج- π شناخته‌شده‌ترین روش است [۱۰].

پلی‌استیلن (PA)

پلی‌استیلن نخستین بار از طریق پلیمرشدن زیگلر-ناتا سنتز شد. این سنتز از طریق پخش گاز استیلن با فشار ۱ atm در محلول حاوی تولوئن و کاتالیزگر زیگلر-ناتا انجام می‌گیرد [۱۱]. سنتز پلی‌استیلن با روش‌های جایگزین مانند سنتز الکتروشیمیایی و حلقه‌گشایی نیز امکان‌پذیر است [۹]. دوپه‌شدن پلی‌استیلن موجب افزایش شایان توجه رسانندگی می‌شود، اما پایداری رسانندگی در هوا بسیار محدود است. به‌طوری‌که پودر دوپه‌شده، تنها کسری ناچیز از رسانندگی اولیه خود را حفظ می‌کند [۲،۷]. نمونه‌های فیلمی، هرچند فراورش‌پذیری بهتر و کشش‌پذیری زیادی دارند، اما این افزایش طول با کاهش شدید رسانندگی همراه است. برای نمونه در فیلم‌های فراورش‌پذیر، کاهش رسانندگی از 100000 S/cm به

16000 S/cm مشاهده شده است [۱۲]. این محدودیت‌ها، همراه با انعطاف‌پذیری کم و دشواری فراورش‌پذیری، کاربرد PA را عمدتاً به دیودهای گسیل نوری و برخی سلول‌های خورشیدی محدود کرده است [۲،۹،۱۱].

پلی‌آنیلین (PANI)

PANI از طریق سنتز الکتروشیمیایی یا پلیمرشدن اکسایشی با آغازگر آمونیوم پرسولفات تولید می‌شود [۱۳،۱۴]. پس از دوپه‌شدن با سولفوریک اسید، رسانندگی آن افزایش چشمگیری می‌یابد و از پلیمرهای رسانای درخور توجه محسوب می‌شود [۱۵]. با این حال، حفظ رسانندگی در هوا محدود است و تنها حدود ۹٪ از مقدار اولیه آن حفظ می‌شود. این مسئله پنجره مصرف کوتاه و محدودیت کاربرد عملی آن را نشان می‌دهد [۱۶]. بدین دلیل، PANI اغلب به‌شکل کامپوزیت یا نانوکامپوزیت استفاده می‌شود تا پایداری و فراورش‌پذیری بهبود یافته و امکان بهره‌برداری از رسانندگی آن در طول زمان افزایش یابد [۱۴،۱۷].

پلی‌پیرول (PPy)

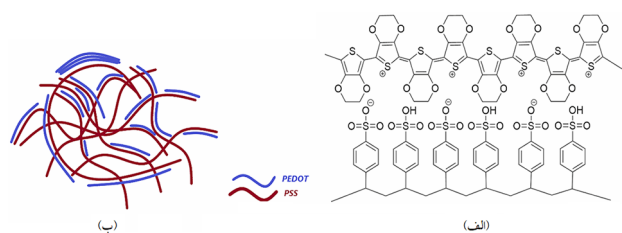
PPy ساختار ناجورحلقه‌ای نیتروژنی دارد و پیش از دوپه‌شدن عایق است. طی اکسایش، ساختار بنزنوئیدی به کینوئیدی تبدیل و پیوند مزدوج- π ایجاد می‌شود که نیمه‌رسانایی را برای آن به همراه دارد. دوپه‌شدن با نمک‌های سولفونیک اسیدی، افزون‌بر افزایش رسانندگی، اتصالات عرضی را در ساختار آن ایجاد می‌کند و امکان تولید پودر و نانوذرات را فراهم می‌سازد. با وجود این، پایداری رسانندگی PPy دوپه‌شده در هوا حدود ۲۰٪ مقدار اولیه است و پنجره مصرف کوتاهی دارد. این مسئله، تولید فیلم‌های یکدست با رسانندگی پایدار و فراورش‌پذیری مناسب را چالش برانگیز می‌کند [۹،۱۸،۱۹].

پلی‌فینیل وینیلین (PPV)

PPV و مشتقات آن قابلیت فیلم‌شدن با ساختار بلوری را دارند و رسانندگی آن‌ها پس از دوپه‌شدن افزایش می‌یابد. با این حال، حفظ رسانندگی در زمان بسیار محدود است. تنها حدود ۱٪ از رسانندگی اولیه باقی می‌ماند که کاربرد عملی آن را عمدتاً به LEDها و حسگرهای فوتوولتایی محدود می‌کند [۲۰-۲۲].

پلی‌تیوفن (PTh)

پلی‌تیوفن (PTh)، پلیمر رسانای ذاتی ناجورحلقه‌ای گوگردی است که به دلیل پایداری نسبی در محیط‌های مختلف و قابلیت حفظ



شکل ۴- (الف) ساختار شیمیایی فرضی و (ب) ساختار فرضی ژل کلئیدی PEDOT:PSS [۳۱، ۱۰].

اولیه، بهبود فراورشی پذیری PEDOT بود. سولفون دارشدن PSS، موجب افزایش قطبیت آن شد و تشکیل فیلم های نازک را آسان تر کرد. بخش قطبی PSS باعث می شود تا PEDOT به شکل ذرات کلئیدی ژل شده در آب پراکنده شود. این پراکنش کلئیدی بدون اتصال عرضی واقعی است و تنها به دلیل وجود بخش های حل پذیر و حل ناپذیر در ساختار ژل ایجاد می شود. این ویژگی کاهش هزینه تولید و بهبود فراورشی پذیری را به همراه دارد [۳۱-۲۹].

در شکل ۴، ساختار شیمیایی فرضی و ساختار کلئیدی این پلیمر رسانا به تصویر کشیده شده است. واژه فرضی بدین معناست که هیچ گونه تأکید مشخصی بر نوع نظم فضایی PSS وجود ندارد و ساختار آن می تواند به شکل منظم یا بی نظم باشد. در مرحله دوپه سازی ثانویه، دوپه کننده های مرسوم شامل اتیلن گلیکول، دی متیل سولفوکسید و سولفوریک اسید به کار رفتند تا رسانندگی و خواص مکانیکی بهبود یابد. همچنین، دوپه کننده های کربوهیدراتی مانند سوربیتول و گلیسرول با اعمال چرخه های آب زدایی، ساختار سه بعدی مطلوبی را ایجاد کردند. نتایج اثر این دوپه کننده ها در جدول ۱ درج شده است.

پایداری رسانندگی PEDOT:PSS دوپه شده با نیتریک اسید حدود ۸۵٪ از مقدار اولیه حفظ شد که نشانگر عملکرد طولانی مدت مناسب آن است. این مراحل به رسانندگی بسیار زیاد حتی در ضخامت نازک ۲۰ nm منجر شد که قابلیت به کارگیری

جدول ۱- اثر دوپه کننده ها بر رسانندگی PEDOT:PSS [۳۲].

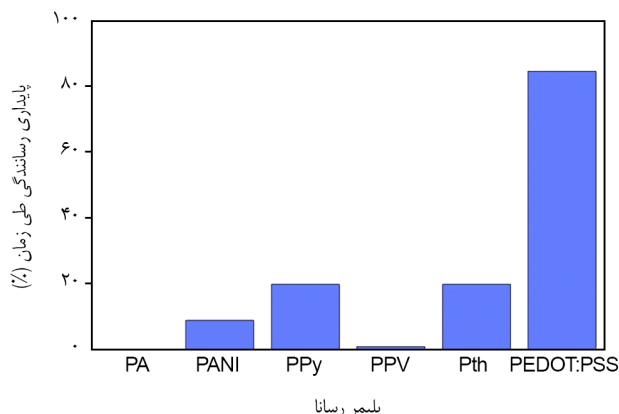
نوع PEDOT:PSS	دوپه کننده	رسانندگی (S/cm)	
		پیش از دوپه شدن	پس از دوپه شدن
PH500	اتیلن گلیکول	۰/۴	۴۴۳
PH1000	دی متیل سولفوکسید	۰/۲	۶۷۰
P	سوربیتول	۰/۲ - ۱	۱۰۰
PH500	گلیسرول	۰/۲ - ۱	۴۵۰

رسانندگی در زمان کوتاه نسبت به بسیاری از پلیمرهای رسانا عملکرد بهتری دارد [۲۴، ۲۳]. انتقال بار در PT از طریق پیوندهای مزدوج- π انجام می شود و این ساختار زمینه ای برای رسانندگی آن را فراهم می کند. با این حال، فراورشی پذیری PT خالص محدود است و تولید فیلم های یکنواخت و انعطاف پذیر با رسانندگی زیاد دشوار است [۲۴، ۲۵]. برای بهبود این محدودیت، از مشتقات PT استفاده می شود که مهم ترین آن ها پلی اتیلن دی اکسی تیوفن (PEDOT) است. با افزودن گروه های اکسیژن دار و جایگزینی دو آلکوکسی، PEDOT رسانندگی بیشتر، پایداری محیطی مناسب و حفظ رسانندگی طولانی تری را نسبت به PT فراهم می کند [۲۳، ۵]. افزون بر این، PEDOT امکان تولید فیلم های فرایند پذیر و انعطاف پذیر را نیز دارد، در حالی که PT خالص اغلب در این زمینه محدودیت دارد. PEDOT و مشتقات آن قابلیت رسانندگی را در طول زمان و در مجاورت رطوبت و هوا حفظ می کنند. با افزودن دوپه کننده ها یا ترکیب با مواد نانو، این پایداری و رسانندگی بهبود می یابد [۶۱، ۵۴]. این پلیمرها به دلیل ترکیب رسانندگی زیاد، پایداری محیطی و فراورشی پذیری در کاربردهایی مانند زخم پوش های رسانا، غشاهای جداسازی الکتریکی و فیلم های انعطاف پذیر برای تولید الکتریسته با لمس دست استفاده می شوند [۲۸-۲۶].

پلی (۴،۳-اتیلن دی اکسی تیوفن): پلی (استیرن سولفونات) (PEDOT:PSS)

این کمپلکس پلیمر رسانا ابتدا در مطالعات یافتن یون های متقابل مناسب برای PEDOT به دست آمد. انگیزه اصلی انجام این آزمایش ها، نیاز به پلیمری رسانا با فراورشی پذیری بهتر در کنار رسانندگی زیاد و حفظ آن بود. با استفاده از پلیمرشدن الکتروشیمیایی، اثر یون های متقابل مختلف بر PEDOT بررسی شد. بازه رسانندگی حاصل از این آزمایش ها بین ۸/۵ S/cm تا ۶۵۰ S/cm بود که کمترین آن مربوط به یون منفی بیس (تری فلوروئورومتیل سولفونیل) و بیشترین آن مربوط به یون پرکلرات بود. در میان این یون ها، یون های سولفات و پلی استیرن سولفونات (PSS) نیز بررسی شدند که رسانندگی آن ها به ترتیب بین ۴۰-۵۰ و ۵۰-۸۰ S/cm گزارش شد.

در سنتز اکسایشی PEDOT، یکی از اکسندده های اصلی سدیم پرسولفات است. در هنگام اکسایش، این یون به سولفات کاهش می یابد و به عنوان یون متقابل عمل می کند. اما طبق گزارش ها عملکرد آن کافی نیست و با معرفی PSS سولفون دارشده و دوپه کننده ها در قالب کمپلکس یونی، نتایج بهبود یافته ای حاصل شد. یکی از مزایای اصلی به کارگیری PSS به عنوان کمپلکس یا دوپه

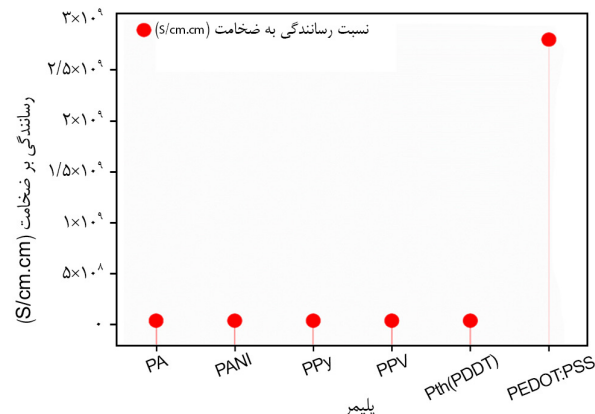


شکل ۶- مقایسه پایداری و حفظ رسانندگی در طول زمان پلیمرهای رسانا در شرایط متغیر [۲، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۴، ۳۳].

مسئله نشان می‌دهد، ترکیب ویژگی‌های الکتریکی زیاد و پایداری شیمیایی، عامل اصلی پیشی گرفتن این پلیمر از سایر نمونه‌هاست.

نتیجه گیری

در دهه‌های اخیر، پلیمرهای رسانا به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین گروه‌های ساختارهای پلیمری، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. در این مواد، فرایند انتقال بار به ماهیت و نوع بار موجود در پلیمر وابسته است. اکسایش مونومرها نقش تعیین‌کننده‌ای در رسانندگی ذاتی این دسته از پلیمرها دارد و در کنار آن، روش سنتز شیمیایی نیز عامل کلیدی در بهبود یا کاهش عملکرد الکتریکی محسوب می‌شود. شناخته‌شده‌ترین روش سنتز پلیمرهای رسانا، پلیمرشدن اکسایشی است که به دلیل هزینه کمتر و امکان تنظیم رسانندگی طی فرایند سنتز، کاربرد گسترده‌ای یافته است. برای رفع محدودیت عدم امکان مقایسه به دلیل گزارش رسانندگی پلیمرهای با ضخامت‌های متفاوت، معیار «نسبت رسانندگی به ضخامت» معرفی شده است که ارزیابی دقیق‌تر عملکرد را امکان‌پذیر می‌سازد. افزون‌براین، استفاده از دوپه‌کننده‌ها نقش مؤثری در افزایش رسانندگی دارد، هرچند در برخی موارد، دوپه کردن به افت خواص مکانیکی و شکنندگی بیشتر پلیمر منجر می‌شود. بسیاری از پلیمرهای رسانا، با وجود دستیابی به رسانندگی‌های زیاد، به دلیل فراورشی‌پذیری نامناسب و شکنندگی فیلم‌های نازک آن‌ها، پایداری رسانندگی را در بازه‌های زمانی کوتاه از دست می‌دهند. در مقابل، PEDOT:PSS به دلیل پراکنش مناسب در محیط‌های آبی، فراورشی‌پذیری زیاد و پایداری درخورد توجه، عملکرد متمایزی



شکل ۵- نسبت تعریف‌شده رسانندگی به ضخامت برای بررسی برتری رسانندگی PEDOT:PSS [۱۰، ۱۴، ۳۳-۳۵].

PEDOT:PSS را در کاربردهای صنعتی و الکترونیکی نشان می‌دهد. بدین ترتیب، تمرکز مرحله‌ای بر PSS و دوپه‌کننده‌ها؛ حفظ رسانندگی، پایداری و فراورشی‌پذیری زیاد PEDOT:PSS را به طور مؤثر تضمین می‌کند [۵، ۲۹، ۳۰، ۳۲، ۳۳]. از آنجاکه مطالعات پیشین، رسانندگی این پلیمرها را در ضخامت‌های متفاوت گزارش کرده‌اند، مقایسه مستقیم آن‌ها در مقیاس یکسان امکان‌پذیر نیست. به منظور دستیابی به مقایسه‌ای دقیق‌تر، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نسبت رسانندگی به ضخامت با واحد $S \cdot cm^{-2}$ تعریف شده است. این رویکرد با حذف اثر متغیر ضخامت، امکان ارزیابی عملکرد پلیمرها را در یک چارچوب استاندارد فراهم می‌سازد. در نتیجه، دیدگاه شفاف‌تری نسبت به اختلافات عملکردی آن‌ها را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، رسانندگی PEDOT:PSS در حالت دوپه‌شده به طور شایان توجهی بیش از سایر پلیمرهای رساناست. این تفاوت چشمگیر عملکرد، مزیت برجسته این پلیمر را در کاربردهای الکترونیکی و رسانندگی نشان می‌دهد و بر اهمیت فرایند دوپه کردن در بهبود خواص الکتریکی آن تأکید می‌کند. رسانندگی به تنهایی نمی‌تواند معیار کاملی برای ارزیابی برتری PEDOT:PSS نسبت به سایر پلیمرهای رسانا باشد. بررسی جامع نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که پایداری رسانندگی در مواجهه با عوامل محیطی و غیرمحیطی، از جمله نور خورشید، تغییرات دما، رطوبت هوا، بخار حلال‌های آلی و حتی تماس با هوا، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد بلندمدت این پلیمر دارد.

همان‌طور که در شکل ۶ به طور مقایسه‌ای ارائه شده است، PEDOT:PSS در حفظ رسانندگی تحت شرایط متغیر به طور درخور توجهی بهتر عمل می‌کند. این موضوع مزیت عملکردی و کاربردی آن را فراتر از مقیاس صرف رسانندگی آشکار می‌سازد. این

رسانندگی با وجود عوامل محیطی طی زمان موجب شده‌اند، PEDOT:PSS در کاربردهای مشابه نسبت به سایر پلیمرهای رسانا انتخاب اول مصرف‌کنندگان باشد.

را نشان داده است. در مطالعات انجام‌شده، دی‌متیل سولفوکسید (DMSO) به‌عنوان یکی از مؤثرترین دوپه‌کننده‌ها برای افزایش رسانندگی PEDOT:PSS معرفی شده است. مجموعه عواملی همچون رسانندگی زیاد، فراورش‌پذیری مناسب و قابلیت حفظ

مراجع

- Singh A.K. and Prakash R., Conduction Mechanism in Electronic Polymers: Effect of Morphology, 2008 2nd National Workshop on Advanced Optoelectronic Materials and Devices, IEEE, pp. 65-74, 2008.
- Nasajpour-Esfahani N., Dastan D., Alizadeh A. et al., A Critical Review on Intrinsic Conducting Polymers and Their Applications, *J. Ind. Eng. Chem.*, **125**, 14-37, 2023. doi: 10.1016/j.jiec.2023.05.013
- Zhang L., Zhang J., and Yu J., S-scheme Photocatalyst. in: *Interface Science and Technology*, Elsevier, pp. 53-102, 2023.
- Potje-Kamloth K., Conducting Polymer-Based Schottky Barrier and Heterojunction Diodes and Their Sensor Application, In *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*, Elsevier, pp. 445-494, 2001.
- Elschner A., Kirchmeyer S., Lovenich W. et al, *PEDOT: Principles and Applications of an Intrinsically Conductive Polymer*, CRC, Boca Raton, pp. 377, 2010. doi: 10.1201/b10318
- Ocean In Situ Sensors Crosscutting Innovations. In *Challenges and Innovations in Ocean in Situ Sensors*, Delory E. and Pearlman J. (Eds.), Elsevier, pp 117–171, 2019.
- Graham MacDiarmid A., Mammone R.J., Kaner R.B., and Porter L., The Concept of ‘Doping’ of Conducting Polymers: The Role of Reduction Potentials, *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, **314** (1528), 3-15, 1985. doi: 10.1098/rsta.1985.0004
- Naftaly M., Das S., Gallop J. et al., Sheet Resistance Measurements of Conductive Thin Films: A Comparison of Techniques, *Electronics*, **10**(8), 960, 2021. doi: 10.3390/electronics10080960
- Calvert P., Electrically Conducting Polymers, *Nature*, **284**(5753), 213-214, 1980.
- Pang A.L., Arsad A., and Ahmadipour M., Synthesis and Factor Affecting on the Conductivity of Polypyrrole: A Short Review, *Polym. Adv. Tech.*, **32**(4), 1428-1454, 2021. doi: 10.1002/pat.5201
- MacDiarmid A.G. and Heeger A.J., Organic Metals and Semiconductors: The Chemistry of Polyacetylene, (CH)_x, and Its Derivatives, *Synth. Met.*, **1**(2), 101-118, 1980.
- Naarmann H. and Theophilou N., New Process for the Production of Metal-Like, Stable Polyacetylene, *Synth. Met.*, **22**(1), 1–8, 1987.
- Prasutiyo Y.J., Manaf A., and Hafizah M.A.E., Synthesis of Polyaniline by Chemical Oxidative Polymerization and Characteristic of Conductivity and Reflection for Various Strong Acid Dopants, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 012003, 2020.
- Ziadan K.M. and Saadon W.T., Study of the Electrical Characteristics of Polyaniline Prepared by Electrochemical Polymerization, *Energy Proced.*, **19**, 71-79, 2012. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.184
- Beygisangchin M., Baghdadi A.H., Kamarudin S.K. et al., Recent Progress in Polyaniline and Its Composites; Synthesis, Properties, and Applications, *Eur. Polym. J.*, **210**, 112948, 2024.
- Rannou P. and Nechtschein M., Aging Studies on Polyaniline: Conductivity and Thermal Stability, *Synth. Met.*, **84**, 755-756, 1997. doi: 10.1016/S0379-6779(96)04131-8
- Cho S., Lee J.S., Jun J. et al., Fabrication of Water-Dispersible and Highly Conductive PSS-Doped PANI/Graphene Nanocomposites Using a High-Molecular Weight PSS Dopant and Their Application in H₂ S Detection, *Nanoscale*, **6**, 15181-15195, 2014. doi: 10.1039/C4NR04413D
- Chehimi M.M. and Abdeljalil E., A Study of the Degradation and Stability of Polypyrrole by Inverse Gas Chromatography, X-ray Photoelectron Spectroscopy, and Conductivity Measurements, *Synth. Metal.*, **145**, 15-22, 2004. doi: 10.1016/j.synthmet.2004.03.015
- John J., Saheeda P., Sabeera K., and Jayalekshmi S., Doped Polypyrrole with Good Solubility and Film Forming Properties Suitable for Device Applications, *Mater. Today: Proc.*, **5**, 21140-21146, 2018. doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.512
- Ahlskog M., Reghu M., Noguchi T., and Ohnishi T., Doping and Conductivity Studies on Poly(p-phenylene vinylene), *Synth. Metal.*, **89**, 11-15, 1997.
- Yang Z., Geise H.J., Mehdod M. et al., Conductivity and Electron density of Undoped Model Compounds of Poly(phenylene vinylene), *Synth. Metal.*, **39**, 137-151, 1990. doi: 10.1016/0379-6779(90)90179-O
- Goyal M., Singh K., and Bhatnagar N., Conductive Polymers: A Multipurpose Material for Protecting Coating, *Prog. Org. Coat.*, **187**, 108083, 2024. doi: 10.1016/j.porgcoat.2023.108083

23. Kaloni T.P., Giesbrecht P.K., Schreckenbach G., and Freund M.S., Polythiophene: From Fundamental Perspectives to Applications, *Chem. Mater.*, **29**, 10248-10283, 2017. doi: 10.1021/acs.chemmater.7b03035
24. Husain A., Ahmad S., Ansari S.P. et al., DC Electrical Conductivity Retention and Acetone/Acetaldehyde Sensing on Polythiophene/Molybdenum Disulphide Composites, *Polym. Polym. Compos.*, **29**, S422-S431, 2021. doi: 10.1177/096739112111002781
25. Husain A., Ahmad S., and Mohammad F., Electrical Conductivity and Alcohol Sensing Studies on Polythiophene/Tin Oxide Nanocomposites, *J. Sci.: Adv. Mater. Device.*, **5**, 84-94, 2020.
26. Park T., Park C., Kim B. et al., Flexible PEDOT Electrodes with Large Thermoelectric Power Factors to Generate Electricity by the Touch of Fingertips, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 788, 2013. doi: 10.1039/c3ee23729j
27. Yao M., Wang Z., Li Z. et al., Facile In-Situ Electrosynthesis of a Novel PEDOT Derivative for Efficient Uranium Electro-extraction, *Sep. Purif. Technol.*, **365**, 132432, 2025.
28. Castrejón-Comas V., Mataró N., Resina L. et al., Electro-Responsive Hyaluronic Acid-Based Click-Hydrogels for Wound Healing, *Carbohydr. Polym.*, **348**, 122941, 2025. doi: 10.1016/j.carbpol.2024.122941
29. Sakunpongpitiporn P., Phasuksom K., Paradee N., and Sirivat A., Facile Synthesis of Highly Conductive PEDOT: PSS Via Surfactant Templates, *RSC Adv.*, **9**, 6363-6378, 2019.
30. Horii T., Hikawa H., Mochizuki Y., and Okuzaki H., Synthesis and Characterization of Highly Conductive PEDOT/PSS Col-loidal Gels, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.*, **37**, 515-518, 2012.
31. Muro K., Watanabe M., Tamai T. et al., PEDOT/PSS Nanopar-ticles: Synthesis and Properties, *RSC Adv.*, **6**, 87147-87152, 2016.
32. Shi H., Liu C., Jiang Q., and Xu J., Effective Approaches to Improve the Electrical Conductivity of PEDOT:PSS: A Review, *Adv. Elect. Mater.*, **1**(4), 1500017, 2015. doi: 10.1002/aelm.201500017
33. Adilbekova B., Scaccabarozzi A.D., Faber H. et al., Enhanc-ing the Electrical Conductivity and Long-Term Stability of PEDOT:PSS Electrodes through Sequential Treatment with Nitric Acid and Cesium Chloride, *Adv. Mater.*, **36**, 2405094, 2024. <https://doi.org/10.1002/adma.202405094>
34. Park Y.W., Park C., Lee Y.S. et al., Electrical Conductivity of Highly-Oriented Polyacetylene, *Solid State Commun.*, **65**, 147-150, 1988.
35. Gruber J., Li R.W.C., and Hümmelgen I.A., Synthesis, Prop-erties, and Applications of Poly(p-phenylene vinylene) S, In *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*, Elsevier, pp. 163-184, 2001.