

## مزایای ارگانیک الکترونیک‌ها نسبت به غیرارگانیک‌ها و بررسی پیشرفت آنها از منظر شیمی

زهرا کچوئی<sup>۱</sup>، فرزانه هاشمی نصر<sup>۲</sup>، مهدی صالحی راد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دکترای شیمی پلیمر از دانشگاه تهران، محقق دوره پسا دکتري از دانشگاه تهران، کارشناس پروژه در گروه پژوهشی شیمی و فرایند پژوهشگاه نیرو

<sup>۲</sup>دکترای شیمی پلیمر از دانشگاه تهران، محقق دوره پسا دکتري از پژوهشگاه نیرو، کارشناس پروژه در گروه پژوهشی شیمی و فرایند پژوهشگاه نیرو

<sup>۲</sup>مدیر گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو

### نام نویسنده مسئول:

مهدی صالحی راد

### چکیده

موضوع ارگانیک الکترونیک در سال‌های اخیر در بسیاری از گروه‌های تحقیقاتی مورد توجه و پیشرفت قرار گرفته است که این پیشرفت‌ها در هر دو زمینه دانش و تولید دستگاهی مربوط به علوم پایه شیمی، فیزیک و مواد می‌باشند. دو دیدگاه کلی در زمینه اهمیت ارگانیک الکترونیک به شرح زیر می‌باشد: با تجهیزات ارگانیک الکترونیک، قادر به دستیابی به خواصی خواهیم بود که الکترونیک بر پایه سیلیکون از عهده آن بر نمی‌آیند. از آنجایی که تعداد ترکیبات آلی و پلیمری قابل کاربرد در این زمینه گسترده است، لذا تحقیق و توسعه در این زمینه هر چه بیشتر و جذاب‌تر خواهد بود. همچنین، نسبت به قطعات الکترونیکی در دنیای امروز، تجهیزات ارگانیک الکترونیک و نیز فرآیند تولید آن‌ها میزان مصرف انرژی بهینه داشته، دوستدار محیط زیست بوده و لذا سبب ایجاد یک دنیای الکترونیک پایدارتر خواهند شد. اهمیت موضوع ارگانیک الکترونیک به‌گونه‌ای است که منجر به تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بهبود مواد تشکیل دهنده آن از قبیل پلیمرهای رسانا، دی الکترونیک و نیمه رساناها و بررسی فرایند ساخت قطعات ارگانیک الکترونیک گردیده است.

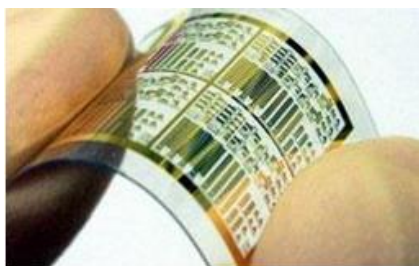
**واژگان کلیدی:** ارگانیک الکترونیک، الکترونیک بر پایه سیلیکون، ترکیبات آلی و پلیمری، انعطاف پذیری، مصرف بهینه انرژی.

**۱- مقدمه**

زمانی که در مورد الکترونیک فکر می‌کنیم، اولین چیزی که به ذهن می‌آید، تراشه‌ها و مدارهای ساخته شده از سیلیکون است. با وجود این که همچنان از سیلیکون در صنعت برق و الکترونیک استفاده می‌گردد، اما امروزه نوع جدیدی از الکترونیک به زندگی روزمره وارد شده است که قابلیت چاپ بر روی سطوح انعطاف پذیر را دارا می‌باشد. ارگانیک الکترونیک به عنوان یک جانشین برای الکترونیک سنتی مبتنی بر سیلیکون مطرح گردیده و قابلیت‌های مشابهی از خود بروز داده است. از آن جایی که نوع مواد مورد استفاده شامل مولکول‌های کوچک یا پلیمرهای بر پایه کربن می‌باشد، لذا به این تکنولوژی، پلیمر الکترونیک یا پلاستیک الکترونیک نیز گفته می‌شود. این مقاله، در راستای بررسی تکنولوژی جدید مرتبط با صنعت برق نظیر منابع تولید انرژی برق از ادوات آلی- پلیمری (سلول‌های خورشیدی پلیمری)، ذخیره-سازهای انرژی آلی- پلیمری (ابرها خازن‌های آلی و باتری‌های لیتیم- پلیمر)، قطعات آلی- پلیمری (دیودهای ساطع کننده نور آلی (OLED) و ترانزیستورهای آلی) مورد نیاز در صنعت برق خواهد بود.

**۲- محدودیت‌های الکترونیک بر پایه نیمه رساناهای معدنی سنتی و مزایای ارگانیک الکترونیک‌ها**

**۲-۱- قابلیت انعطاف پذیری قطعات ارگانیک الکترونیک:** یکی از ضعف‌های سیلیکون پلی کریستالی سختی و شکنندگی شبکه‌های بلوری آن است. اگر چنین فیلم سیلیکونی به صورت یک بستر انعطاف پذیر خمیده شود، ساختار کریستالی آن آسیب دیده و مرزهای ذرات کریستالی بیشتر ایجاد می‌شود [۱]. در مقابل، مزیت مواد آلی به ویژه پلیمرها و حتی مواد بلوری مانند روبرین (تترافنیل تتراسن)، این است که فیلم‌های این ماده بدون شکستن می‌توانند تحت تنش قرار گرفته و پس از خم شدن خواص الکترونیکی خود را حفظ می‌کنند، زیرا هیچ شبکه کریستالی کووالانسی برای تخریب وجود ندارد [۲]. شکل ۱ نیمه رسانای ارگانیک قابل انعطاف را نشان می‌دهد. مدارها بر روی یک بستر ارگانیک منعطف و شفاف ساخته شده‌اند.



شکل ۱. نیمه رسانای ارگانیک قابل انعطاف

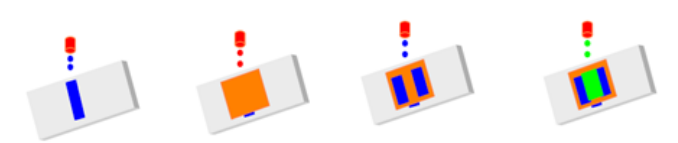
**۲-۲- فرایند ساخت ساده تر و سریعتر قطعات ارگانیک الکترونیک:** جهت ساخت قطعات الکترونیک سنتی بر پایه سیلیکون، لایه نشانی فیزیکی به چهار روش می‌تواند صورت پذیرد؛ فضای خلا تبخیر، لایه نشانی با روش جدا کردن (Sputtering Deposition)، Molecular Beam Epitaxy، لایه نشانی با خوشه یونیزه شده و یون‌های متمرکز شده. روش‌های لایه نشانی الکترونیک سیلیکونی، سخت و هزینه بر است.

پوشش‌دهی چرخشی روشی متداول برای پوشش‌دهی لایه‌های پلیمری در قطعات ارگانیک الکترونیک است. بدین منظور، از دستگاه پوشش‌دهی چرخشی استفاده می‌شود که قابلیت تنظیم سرعت را در زمان پوشش‌دهی دارد. همچنین، به منظور تشکیل لایه‌هایی با ضخامت کم یا زیاد یا با شکل‌شناسی یکنواخت، تغییر سرعت چرخش دستگاه در جهت مطلوب امکان‌پذیر است. ضخامت، شکل‌شناسی و

توپوگرافی سطحی فیلم تهیه شده با این روش بسیار تکرارپذیر است. ضخامت فیلم به دست آمده به سرعت چرخش و گرانیوی محلول بستگی دارد [۳].

در روش دیگری که پوشش‌دهی تیغه ای نامیده می‌شود، در اثر حرکت تیغه تیز در فاصله ای معین نسبت به بستر، لایه نازکی از مواد بر سطح زیرلایه به جا می‌ماند. در این روش، نسبت به روش قبل در مصرف مواد به کار گرفته شده بیشتر صرفه جویی می‌شود، اما سرعت این فرآیند پایین است و لذا برای محلول‌هایی با غلظت بالا که تمایل به تجمع یا تبلور دارند، مناسب نیست [۴].

در روش دیگری با نام چاپ جوهرافشان، قطره‌های ریزی از محلول نمونه روی سطح زیرلایه پاشیده می‌شود. تشکیل این قطره‌ها با اعمال فشار مکانیکی روی محلول نمونه انجام پذیر است. سپس، این قطره‌ها باردار می‌شوند و با کمک میدان الکتریکی به سمت زیرلایه شتاب می‌یابند. در این روش، محلول نمونه باید از گرانیوی کمی برخوردار بوده و از نظر الکتریکی باردار باشد. بدین ترتیب، می‌توان چند لایه از مواد مختلف را به سادگی روی هم پوشش داد [۵ و ۶].



شکل ۲. طرح شماتیک ساخت یک ترانزیستور با استفاده از تکنیک چاپ

برای پوشش دهی در مقیاس تجاری از روش‌های پیوسته استفاده می‌شود. مهم‌ترین این روش‌ها فن غلتک است که با عنوان قرقره به قرقره یا غلتک به غلتک شناخته می‌شود. در این روش از زیرلایه‌های انعطاف پذیری استفاده شده که روی غلتک حرکت می‌کنند. بدین ترتیب، این روش تاکنون تنها به منظور ساخت سلول‌های خورشیدی پلیمری انعطاف پذیر استفاده شده است.

**۳-۲- مصرف بهینه انرژی و دوستدار محیط زیست بودن تجهیزات ارگانیک الکترونیک:** همچنان که دانشمندان و مهندسان شیمی، به بهبود سنتز و شناسایی مواد آلی به جهت استفاده در الکترونیک ادامه می‌دهند، امید بر این است که استفاده از چنین موادی باعث تولید نمایشگرهای الکترونیکی، لامپ‌ها، سلول‌های خورشیدی، ترانزیستورها و سایر دستگاه‌های الکترونیکی شود که انرژی کارآمدتر هستند. برای مثال، سلول‌های خورشیدی ارگانیک که تاکنون بسیار انرژی-کارآمد هستند، زمان کارکرد کمتر از شش ماه دارند، که باید همچنان بهره وری انرژی آن‌ها بهبود یابد تا بتواند به عنوان یک تکنولوژی گسترده در مکان‌هایی مانند شمال اروپا که دوره‌های طولانی تابش نور خورشید در آنجا فقط یک رویا است، به کار رود [۷].

**۴-۲- فرآیند تولید سازگارتر با محیط زیست قطعات ارگانیک الکترونیک:** استفاده از مواد آلی برای ساختن قطعات الکترونیکی، نوید بخش این مساله خواهد بود که روش‌های تولید در آینده بر مقدار مواد خام کمتر، بی خطرتر و فراوان تری تکیه خواهد کرد. می‌توان با تکیه بر فرآیندهای کم مصرف مانند چاپ، در مقایسه با پوشش دهی چرخشی در میزان مصرفی صرفه‌جویی نمود. به کمک تکنیک چاپ، به سازه‌ها یا قطعات به صورت لایه لایه اضافه می‌شوند، اما در روش پوشش دهی چرخشی، اضافی مواد برداشته شده و خارج می‌گردد. شیمی‌دانان علاوه بر استفاده از میزان کمتری از مواد، به دنبال راه‌هایی برای استفاده از مواد بی خطر هستند. به عنوان مثال، بسیاری

از پلیمرها جهت انحلال نیاز به حلال‌هایی دارند که سرطان‌زا هستند. از این رو، محققان بر آنند که پلیمرهایی با قابلیت انحلال در حلال‌های غیر سمی طراحی نموده و به طور کلی روش‌های ملایم‌تری را به کار گیرند. در نهایت، فراوانی و دوستدار محیط زیست بودن منابع مواد اولیه سبب حفظ منابع با ارزش و پرخطر خواهد شد [۷].

### ۵-۲- دستیابی به مجتمع‌سازی در مقیاس بزرگ برای کوچک کردن ادوات الکترونیک و بالا بردن وضوح صفحات نمایشگر:

الکترونیک سنتی مبتنی بر نیمه رساناهای معدنی مانند سیلیکون، گالیوم آرسنید و ... محدودیتی دارد که مانع مجتمع‌سازی یکپارچه ترانزیستورها و دیگر اجزاء روی بسترهای شیشه، پلاستیک و غیره می‌گردد. در نتیجه، محصولات الکترونیکی اغلب به عنوان اجسام مستقلی وجود دارند که این نوع الکترونیک مانع مجتمع‌سازی غیر گسسته آن‌ها در زندگی امروزی ما می‌شود.

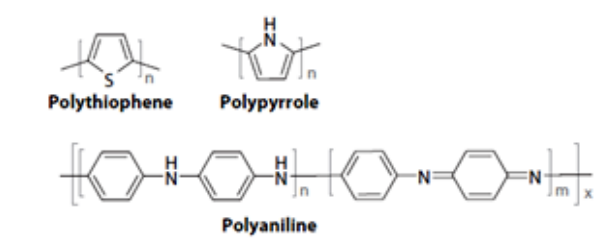
### ۶-۲- محدودیت‌هایی که ساختار کریستالی ویفر سیلیکون بر نیمه رساناهای سنتی اعمال می‌کند: الکترونیک سنتی نیاز به یک

لایه نیمه رسانای کریستالی داشته که در این رابطه از مراحل فرایند اکسیداسیون، نفوذ و ... که نیاز به درجه حرارت بیش از نقطه ذوب شیشه و پلاستیک دارد استفاده می‌نماید. بستر مورد نیاز برای ترانزیستور پیوندی دوقطبی سیلیکونی یا ترانزیستور اثر میدانی اکسید فلزی، ویفر سیلیکونی کریستالی است. سیلیکون پلی کریستالی یک ماده سخت بوده و خواص الکترونیک یک فیلم سیلیکون به اندازه ذرات کریستال بستگی دارد. هر چه اندازه ذرات کوچکتر باشد، حامل‌های بار با مرز ذرات بیشتری مواجه خواهند شد. این موارد به میزان زیادی عملکرد قطعه را محدود می‌کنند. همچنین، فرآیندهای لازم برای افزایش اندازه ذرات کریستالین نیاز به دمای بالا دارند. علاوه بر آن، اندکی نقص و جابجایی در ساختار کریستال که موجب تخریب تقارن کریستال می‌شود، قادر به غیرفعال نمودن کل قطعه الکترونیک می‌باشد [۸].

### ۳- مواد تشکیل دهنده ارگانیک الکترونیک‌ها

مواد مورد نیاز ارگانیک الکترونیک را می‌توان به سه دسته‌ی رساناها، نیمه‌رساناها و دی‌الکتریک‌ها تقسیم بندی می‌شوند [۹].

۱-۳- پلیمرهای رسانا: به دلیل مناسب بودن پلیمرهای رسانا جهت فرایند چاپ، برای رسانش و برقراری تماس در قطعه‌های آلی ترجیح داده می‌شوند. سه دسته اصلی از پلیمرهای رسانای استفاده شده برای الکترونیک چاپی وجود دارد: پلی تیوفن‌ها (و پلی پیرول‌های مرتبط)، پلی آنیلین‌ها و پلیمرهای عایق پر شده با ساختارهای رسانا (شکل ۳).



شکل ۳. ساختار پلیمرهای رسانای الکترونیکی

پلیمرهای رسانا که در ساختار ارگانیک الکترونیک‌ها به کار می‌روند، باید از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ویژه‌ای برخوردار باشند. به گونه‌ای که دستگاهی با کارایی مطلوب به دست آید: این ویژگی‌ها شامل نوار فاصله کوچک، انتقال‌های زیاد در حاملان بار، شکل شناسی مناسب فیلم نازک تهیه شده، تراز انرژی HOMO و LUMO مناسب و انحلال پذیری مطلوب در حلال‌های رایج آلی است.

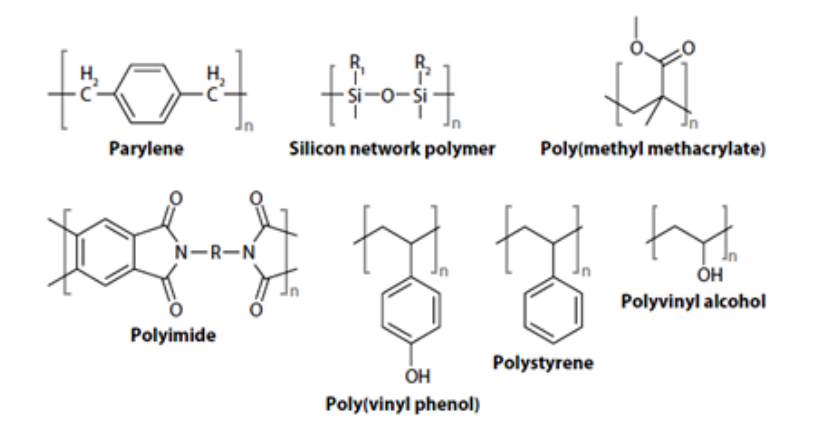
پلی (۳ و ۴- اتیلن دی اکسی تیوفن، PEDOT)، شاید پلیمر رسانا با بیشترین موارد کاربرد برای تماس قطعات ارگانیک الکترونیک باشد [۱۰]. این محصول به صورت تجاری به حالت سوسپانسیون آبی موجود بوده و توسط شرکت بایرن تحت نام تجاری Baytron تولید می‌گردد. فرمولاسیون تجاری آن به دلیل سهولت رسوب گذاری و کارایی آن روی هر دو بستر رسانا و بستر نارسانا، معمولاً برای نمونه سازی اولیه مناسب است. این پلیمر به عنوان سورس و درین در ترانزیستورهای تمام پلیمر چاپ شده به کار می‌رود.

غالباً، به علت نیاز به رسانایی بیشتر، شفافیت بالا، انرژی سطحی پایینتر، افزایش ویسکوزیته و دستیابی به یکنواختی شیمیایی بیشتر، تلاش در جهت اصلاح نمونه‌ها مدنظر است. از اینرو، گروههای تحقیقاتی متعددی تغییرات شیمیایی در جهت اصلاح ساختار بر روی PEDOT را با تغییر توالی حلقه زنجیره اصلی، ماهیت استخلاف‌های دی اکسی، یا جزء یون همراه ایجاد کردند.

۲-۳- پلیمرهای دی الکتریک: مهمترین نقش پلیمرهای عایق در قطعات ارگانیک، گیت دی الکتریک برای ترانزیستورهای اثر میدانی ارگانیک می‌باشد. بسیاری از پلیمرهای رایج، از جمله پلی (متیل متاکریلات)، پلی (وینیل فنل)، پلی استایرن‌ها، پلی وینیل الکل، پلی آمیدها، پلیمرهای شبکه‌ای سیلیکون و پارلین می‌توانند برای این کاربرد مورد استفاده قرار گیرند (شکل ۴).

قطبیت، ویسکوزیته، آب گریزی و سختی پلیمرهای دی الکتریک بر کیفیت فیلمهای نیمه رسانای ارگانیک رشد کرده روی آنها تاثیر می‌گذارد [۱۱].

مواد افزودنی نانوساختار و معدنی مانند اکسیدهای فروالکتریک و نانولوله‌های کربنی اغلب برای تولید کامپوزیت‌های دی الکتریک با حفظ ثابت دی الکتریک بالا افزوده می‌شوند [۱۲].

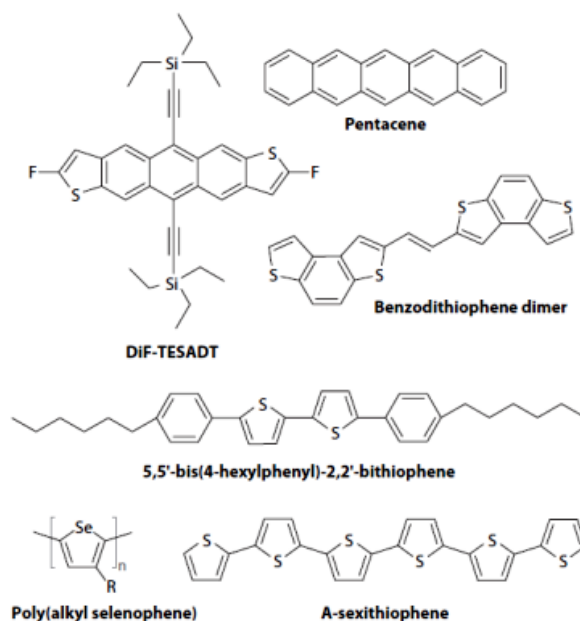


شکل ۴. ساختار پلیمرهای دی الکتریک متداول

۳-۳- نیمه رساناهای آلی و پلیمری: در نیمه رساناها، با اضافه کردن ناخالصی به کریستال خالص آن‌ها می‌توان میزان انرژی گپ را بیش از پیش کاهش داد.

اگر به الکترونی که در تراز ظرفیت است انرژی بیش از مقدار انرژی گپ داده شود، به تراز رسانش منتقل شده و باعث ایجاد الکترون و حفره‌ی آزاد می‌گردد. از همین خاصیت برای ساخت نیمه رساناهای نوع n و p استفاده می‌گردد. دسته‌های اصلی نیمه رساناهای آلی جامد مولکولی انتقال دهنده حفره (نوع p)، از حلقه‌های به هم جوش خورده (پنتاسن، تینوتیوفن، بنزو دی تیوفن، دی تینو آنتراسن و تتراسن)، و زنجیره‌های الیگومری کوتاه از حلقه‌ها ( ترکیبات مختلف تیوفنها، فیلینها، تیاژولها و پیرولها)، اتیلن و گروه‌های اتیلین و سلنوفن‌ها تشکیل شده‌اند. تعدادی از چنین ساختارهایی در شکل ۵ نشان داده شده است. زنجیره‌های جانبی کنترل کننده مورفولوژی، فرآیند پذیری و عملکرد می‌باشند [۱۳].

اخیراً پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه طراحی نیمه رساناهای انتقال حفره پلیمری بر اساس کوپلیمریزاسیون تیوفن با کومونومرهای تک حلقه و حلقه جوش خورده به دست آمده است [۱۴]. ساختار کومونومرها، اندازه زنجیر پلیمرها و قرار دادن زنجیره‌های جانبی، باعث خود تجمعی (self assembly) زنجیره‌ها شده و انتقال بار بین آنها را تسهیل کرده و از اینرو موجب افزایش تحرک حامل‌های بار در توده فیلم می‌گردد.



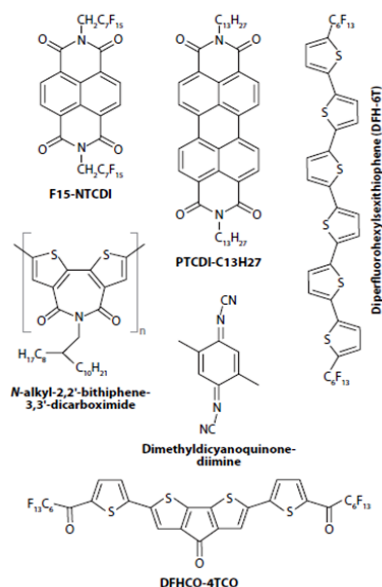
شکل ۵. تعدادی از نیمه رساناهای نوع p

نیمه رساناهای آلی نوع n جهت استفاده از راندمان بیشتر توان مدارهای ترانزیستور مکمل و همچنین برای گسترش قطعاتی که به اتصالات n-p مرتبط هستند، از قبیل مازولهای ترموالکتریکی و سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. الکترون‌های  $\pi$  که می‌تواند پایه نیمه رساناهای آلی نوع n باشد، باید پایداری کافی الکترونها را تزریق شده را نسبت به فرونشاندن‌های محیطی مانند اکسیژن و باقی مانده‌های سنتز در داخل و اطراف نیمه رساناهای آلی فراهم کنند. برای پایداری ترمودینامیکی آنیون رادیکال نسبت به اکسیژن و آب، پتانسیل کاهش نیمه رساناهای آلی نوع n باید مثبت‌تر از الکترودهای کالومل استاندارد (SCE) باشد.

چالش استفاده از چنین موادی می‌تواند جلوگیری از دوپینگ تصادفی توسط عوامل محیطی باشد که آنها را برای همیشه رسانا می‌کند. پایینترین سطح انرژی اوربیتال مولکولی غیر اشغال شده (LUMO) در بیشتر ترکیبات آلی مزدوج، خارج از محدوده مورد نظر برای انتقال الکترون قرار دارد. در سال ۲۰۰۰، کاتز و همکارانش نشان دادند که فیلمهای نازک تبخیر شده به صورت حرارتی از ترکیبات N، N-نفتالین تتراکربوکسیلیک دی ایمید دو استخلافی (NTCDIs)، تحرک الکترونی به میزان مناسب هم در خلاء و هم در هوا نشان داده‌اند [۱۵]. این مواد حتی در معرض هوا، تحرک در حدود  $10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ Vs}^{-1}$  را نشان داده‌اند. زنجیره‌های فلئورو آلکیل دور از هسته در این دست ترکیبات، این نقش را ایفا کرده و اجازه می‌دهند که این ترکیبات در معرض هوا نیز کار نمایند، هرچند سازوکار دقیق آن هنوز ثابت نشده است. حتی یک گروه  $\text{CF}_3$  جداگانه در زنجیره جانبی کوچک مانند بنزیل به میزان قابل توجهی موجب افزایش پایداری در مقابل هوا می‌گردد.

اخیراً، محققان میزان تحرک بالای دیگر زنجیره‌های جانبی با مقطع بزرگ مانند سیکلو هگزیل، استخلاف هسته NTCDI با گروه‌های الکترون کشنده برای افزایش پایداری ترمودینامیکی آنیون رادیکال‌ها و استفاده از دی-ایمیدها مانند پرینل تتراکربوکسیلیک اسید دی ایمید (PTCDIs) و آنتراسن دی کربوکسی ایمید نشان داده‌اند [۱۶]. مجموعه‌ای از PTCDI با استخلافات کوچک مانند اتصال کلر به هسته، اتصال فلئورو به هسته، N-هیپتا فلئورو بوتیل و N-فنیل، تحرک در حدود  $10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ Vs}^{-1}$  نشان دادند که برخی از آنها بیشتر تحرک خود را در معرض هوا نیز حفظ می‌کنند.

جدیدترین نیمه رساناهای آلی نوع n گزارش شده شامل حلقه‌های جوش خورده با استخلاف تری فلئورومتیل، دی ان‌های هتروسیکلیک جوش خورده، آسن‌های با استخلاف پرفلئورو آلکیل و نفتالین تتراکربوکسیلیک دی ایمید با زنجیره‌های جانبی با استخلاف فلئورو بودند. استخلاف فلئورو یک موضوع مشترک میان اغلب این دسته ترکیبات است. گروه‌های عاملی کربونیل نیز در کاهش انرژی الکترون‌های تزریق شده موثر هستند، در حالی که برخی از گروه‌های عاملی دیگر مانند نیترو و اکسا دی آزول تاثیر کمتری داشته‌اند.



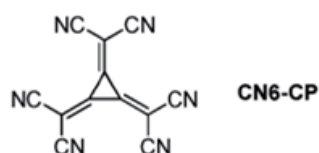
شکل ۶. تعدادی از نیمه رساناهای نوع n

## ۴- بررسی میزان پیشرفت کلی صنعت ارگانیک الکترونیک

به طور کلی، پیشرفت‌های نوین در حوزه‌ی شیمی و نانو شیمی تا حد زیادی به بهبود تمام دستگاه‌های ارگانیک الکترونیک کمک خواهند کرد. این امر به ویژه در مورد OLED، OPV دستگاه‌های الکترونیک منعطف بارزتر است [۸].

مهمترین ویژگی یک نیمه رسانای آلی، تحرک حامل‌های بار است که بهبود آن در پیشرفت صنعت ارگانیک الکترونیک تاثیر بسزایی دارد. از چندین دهه قبل، دوپانت‌ها به طور گسترده‌ای برای نیمه رساناهای غیرارگانیک نیز به کار برده شده‌اند، اما به گفته محققان، این تکنیک برای رساناهای ارگانیک کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در حال حاضر، رایجترین مواد مورد استفاده، دوپانت‌های فلئوئوردار هستند که با ترکیب با نیمه رساناهای ارگانیک مختلف می‌توانند به طور چشمگیری تحرک حاملان بار و رسانایی آنها را افزایش دهند.

اخیراً محققان دانشگاه لومونوسوف مسکو و موسسه لاینیتس در آلمان توانسته‌اند مولکولی را بیابند که به ادعای آنها، می‌تواند انگیزه‌ای برای توسعه الکترونیک ارگانیک باشد [۱۷]. آنها یکی از مشتقات مولکول ۳- رادیالن ( شکل ۷ ) که نزدیک به ۳۰ سال برای دنیای علم شناخته شده است، را جهت ساخت نیمه‌رساناهای ارگانیک استفاده کردند.



شکل ۷. مولکول ۳- رادیالن

دانشمندان بر این باورند که دستاورد مذکور می‌تواند تا حد زیادی به توسعه دستگاه‌های الکترونیک ارگانیک و به طور خاص به ساخت دیویدهای ارگانیک منتشر کننده نور و گروه جدیدی از سلول‌های خورشیدی ارگانیک کمک نماید.

مولکول ۳- رادیالن یک دوپانت بوده و افزودن آن به یک پلیمر نیمه رسانا به میزان قابل ملاحظه‌ای رسانایی الکتریکی آن را افزایش می‌دهد. آزمایشات انجام شده بر روی این مولکول که با نتایج محاسبات شیمیایی کوانتومی نیز تائید شده است، نشان داد این ماده به خوبی با یک پلیمر نیمه رسانا ترکیب شده و رسانایی الکتریکی پلیمر را تا ده‌ها و حتی صدها برابر افزایش داده است.

دومین عامل کلیدی موثر در پیشرفت صنعت ارگانیک الکترونیک، فرآیند کردن ترکیبات ارگانیک است؛ بدین معنی که آیا فیلم‌های آلی نازک با کارایی بالا می‌توانند به روش ساده تهیه گردند، که این امر نه تنها برای کاربردهای تکنولوژیکی بلکه برای مطالعات بنیادی بسیار حائز اهمیت است. کنترل ضخامت ماده ارگانیک در قطعات ارگانیک الکترونیک بسیار اهمیت دارد. با توجه به فشار بخار پایین پلیمرها، تهیه پلیمرها با استفاده از رسوب دهی اشعه مولکولی آلی (OMB) غیرممکن بوده و یا بسیار مشکل است. در نتیجه، دستیابی به لایه‌های پلیمری نازک با درجه بالایی از نظم کریستالی، بسیار پیچیده خواهد بود. به طور کلی، نیمه رساناهای پلیمری آلی احتمالاً به دلیل عدم نظم ساختاری، تحرک حامل‌های بار بسیار کم (کمتر از  $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) دارند.

اخیراً، پیش ماده‌های محلول برخی از الیگومرها نیز سنتز شده‌اند که امکان ساخت فیلم‌های پلی کریستالی بسیار منظم را فراهم می‌آورند. در نتیجه، از ترکیب مزایای فرآیند انعطاف پذیر (به عنوان مثال چاپ) و خواص الکترونیک فوق العاده آنها برخوردار می‌شوند.



سومین عامل کلیدی، شکل‌گیری تماس‌های الکتریکی است. هنگامی که برای ساخت یک قطعه کاربردی، خواه الکترون‌ها و یا حفره‌ها به مواد آلی وارد می‌شوند، این مساله اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. به همین دلیل، برهمکنش بین مولکول‌های آلی و فلزات یکی از موضوعات بسیار مورد توجه در گسترش و پیشرفت قطعات کاربردی است.

خواص ساختاری فصل مشترک مابین نیمه رسانای آلی و دی‌الکتریک، و مابین نیمه رسانای آلی و الکتروود نقش مهمی روی انتقال بار در قطعه الکترونیک دارد [۱۸].

پیشرفت‌های اخیر در دنیا در حوزه این صنعت در جهت اصلاح و بهبود سه عامل کلیدی مطرح شده می‌باشد.

#### ۵- چشم انداز ارگانیک الکترونیک در صنعت برق

ارگانیک الکترونیک با ایجاد یک انقلاب علمی و تکنولوژیکی به سرعت در حال رشد بوده و انتظار می‌رود که تاثیر بسزایی در زندگی ما نسبت به میکروالکترونیک و صنعت برق داشته باشد [۱۹]. مطالعه در زمینه شیمی قطعات الکترونیک و تلاش در جهت توسعه و رفع چالش‌های کنونی به عنوان کلید پیشرفت این صنعت محسوب می‌گردد. پیشرفت‌های اخیر در سنتز ترکیبات آلی منجر به تکامل تقریباً تمامی محصولات الکترونیک نظیر نمایشگرها، چراغ‌های روشنایی، سنسورها، سلول‌های خورشیدی، باتری‌ها و... شده است. عموماً، در هر کاربرد خاص، ترکیبات آلی باید به دقت انتخاب گردند؛ چرا که شرایط تهیه و نیز تعامل آن‌ها با سایر لایه‌ها (آلی یا معدنی) تاثیر بسزایی بر عملکرد دستگاه خواهد داشت [۲۰].

بازار جهانی ارگانیک الکترونیک در سال ۲۰۱۴ درآمدی برابر با ۴۵/۱۶ میلیارد دلار داشته که انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۰، بازار این تکنولوژی با میانگین سرعت رشد سالانه ۵/۲۹٪ در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴، مبلغ ۶/۷۹ میلیارد دلار را به خود اختصاص دهد. بازار این دانش در مراحل اولیه رشد قرار داشته و کاربردهای مختلفی در صنایع مختلف نظیر نمایشگرها، دیودهای ساطع کننده نور آلی جهت تامین روشنایی، ترانزیستورهای آلی، سلول‌های فوتوولتائیک، باتری‌های لیتیوم-پلیمر و... داشته و خواهد داشت. فاکتورهای کلیدی که سبب پیشبرد بازار ارگانیک الکترونیک می‌گردند شامل کاهش در قیمت، وزن و مصرف انرژی محصولات الکترونیک خواهد بود [۲۱].

**۶- نتیجه گیری**

الکترونیک معدنی مبتنی بر نیمه رساناهای معدنی مانع مجتمع سازی یکپارچه ترانزیستورها و دیگر اجزاء روی بسترهای شیشه، پلاستیک و غیره می‌شود. دلیل این امر آن است که الکترونیک معدنی نیاز به یک لایه نیمه رسانای کریستالی داشته و از فرآیندهایی استفاده کرده که نیاز به درجه حرارت و انرژی بسیار زیادی دارد. از سوی دیگر، فرآیندسازی الکترونیک معدنی گرانبه‌تر بوده و قطعات حاصل از آن غیر قابل انعطاف و حساس به تنش می‌باشند. تنش وارده به قطعات الکترونیک معدنی موجب آسیب به ساختار کریستالی آن شده که بر عملکرد قطعه تاثیر می‌گذارد. برای غلبه بر مشکلات همراه با الکترونیک سنتی مبتنی بر مواد معدنی، ارگانیک الکترونیک‌ها معرفی شده‌اند که جهت تهیه آن‌ها از روش‌های ساده و آسان در دمای اتاق می‌توان استفاده نمود. با استفاده از این تکنیک، امکان تولید انبوه قطعات الکترونیکی ارزان قیمت فراهم خواهد شد.

مواد تشکیل دهنده ارگانیک الکترونیک‌ها را می‌توان به سه دسته‌ی رساناها، نیمه‌رساناها و دی‌الکترونیک‌ها تقسیم بندی نمود. رساناهای آلی مورد استفاده ویژگی‌هایی از قبیل نوار فاصله کوچک، انتقال‌های زیاد حاملان بار، شکل شناسی مناسب فیلم نازک تهیه شده، تراز انرژی HOMO و LUMO مناسب و انحلال پذیری مطلوب در حلال‌های رایج آلی را دارا هستند. در نیمه رساناها، با اضافه کردن ناخالصی دوپانت به کریستال خالص آن‌ها می‌توان میزان انرژی گپ را بیش از پیش کاهش داد. نیمه رساناهای آلی و پلیمری مورد استفاده به دو دسته نیمه رساناهای n و p تقسیم بندی می‌شوند. بسیاری از پلیمرهای رایج، از جمله پلی (متیل متاکریلات)، پلی (وینیل فنل)، پلی استایرن‌ها و ... به عنوان دی‌الکترونیک در ارگانیک الکترونیک‌ها استفاده می‌شوند.

پیشرفت‌های نوین در حوزه‌ی ارگانیک الکترونیک در سه بخش کلی بهبود تحرک حامل‌های بار، بهینه ساختن فرآیند کردن ترکیبات ارگانیک و پیشرفت در زمینه خواص فصل مشترک فلز - ترکیبات آلی دسته‌بندی می‌گردد.

با توجه به مطالعات انجام شده، تکنولوژی ارگانیک الکترونیک در زمینه تحقیق و توسعه و نیز فناوری تولید در حال پیشرفت بوده و درآمد سالانه رو به رشدی را برای کشورهای سرمایه‌گذار به همراه خواهد داشت.

## منابع و مراجع

- [1] Y. Sun, J. A. Rogers, "Inorganic semiconductors for flexible electronics", *Adv. Mater.* vol. 19, pp. 1897-1916, 2007.
- [2] A L. Briseno, R. J. Tseng, M. M. Ling, E. H. L. Falcao, Y. Yang, F. Wudl and Z. Bao, "High performance organic single-crystal transistors on flexible substrates", *Adv. Mater.* vol. 18, pp. 2320-2324, 2006.
- [3] K. Kotsuki, H. Tanaka, S. Obata, S. Stauss, K. Terashima and K. Saiki, "The importance of spinning speed in fabrication of spin-coated organic thin film transistors: Film morphology and field effect mobility", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 104, pp. 233306, 2014.
- [4] P. Schilinsky, C. Waldauf and C. J. Brabec, "Performance analysis of printed organic solar cells", *Adv. Funct. Mater.*, vol.16, pp.1669-1672, 2006.
- [5] Y. Yang, S.-C. Chang, J. Bharathan and J. Liu, "Organic/polymeric electroluminescent devices processed by hybrid ink-jet printing", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* vol. 11, pp. 89-96, 2000.
- [6] C. N. Hoth, P. Schilinsky, S. A. Choulis and C. J. Brabec, "Printing highly efficient organic solar cells", *Nano. Lett.* vol. 8, pp. 2806-2813, 2008.
- [7] T. W. Kelley, P. F. Baude, C. Gerlach, D. E. Ender, D. Muyres, M. A. Haase and D. E. Vogel, S. D. Theiss, "Recent Progress in Organic Electronics: Materials, Devices, and Processes", *Chem. Mater.*, vol. 16, pp. 4413-4422, 2004.
- [8] D. Lupo, W. Clemens, S. Breitung and K. Hecker, "Market Perspectives and Road Map for Organic Electronics", in "Organic and Printed Electronics", Edited by G. Nisato, D. Lupo and S. Ganz, Pan Stanford, CRC press, Taylor & Francis, USA, pp. 509, 2016.
- [9] Farchioni, R. and G. Grosso, "Organic electronic materials: conjugated polymers and low molecular weight organic solids", vol. 41. Springer Science & Business Media, 2013.
- [10] J. H. Chen, C. A. Dai, W. Y. Chiu, Synthesis of highly conductive EDOT copolymer films via oxidative chemical in situ polymerization, *J. Polym. Sci. A*, 46, 1662, 2008.
- [11] C. Kim, A. Facchetti, T. J. Marks, Gate dielectric microstructural control of pentacene film growth mode and field-effect transistor performance, *Adv. Mater.* 19, 2561, 2007.
- [12] C. Huang, QM. Zhang, Fully functionalized high-dielectric-constant

- nanophase polymers with high electromechanical response, *Adv. Mater.* 17, 1153, 2005.
- [13] RCG. Naber, C. Tanase, PWM. Blom, GH. Gelinck, AW. Marsman, et al., High-performance solution-processed polymer ferroelectric field-effect transistors, *Nat. Mater.* 4, 243, 2005.
- [14] B. S. Ong, Y. L. Wu, P. Liu, S. Gardner, Structurally ordered polythiophene nanoparticles for highperformance organic thin-film transistors, *Adv. Mater.* 17, 1141, 2005.
- [15] H. E. Katz, J. Johnson, A. J. Lovinger, and W. Li, Naphthalenetetracarboxylic diimide-based n-channel transistor semiconductors: structural variation and thiol-enhanced gold contacts, *J. Am. Chem. Soc.*, 122 (32), 7787, 2000.
- [16] J. Mei, Y. Diao, A. L. Appleton, L. Fang, and Z. Bao, Integrated materials design of organic semiconductors for field-effect transistors, *J. Am. Chem. Soc.*, 135 (18), 6724, 2013.
- [17] Y. Karpov, T. Erdmann, I. Raguzin, M. Al-Hussein, M. Binner, U. Lappan, M. Stamm, K. L. Gerasimov, T. Beryozkina, V. Bakulev, D. V. Anokhin, D. A. Ivanov, F. Günther, S. Gemming, G. Seifert, B. Voit, R. Di Pietro, and A. Kiriy, High conductivity in molecularly p-doped diketopyrrolopyrrole-based polymer: the impact of a high dopant strength and good structural order, *Adv. Mater.* 2016.
- [18] S. K. Hau, H. L. Yip, O. Acton, et al. Interfacial modification to improve inverted polymer solar cells, *Journal of Materials Chemistry* 18, 5113, 2008.
- [19] Organic Electronics Market: By Material (Semiconductor, Conductive, Dielectric and Substrate); by Application (Battery, Conductive Ink, Display, Lighting, Memory, Sensor, OPV, ORFID and Others) -With Forecast (2016-2021), 2014.
- [20] P. Harrop and K. Ghaffarzadeh, "Functional Materials for Future Electronics: Metals, Inorganic & Organic Compounds, Graphene, CNT", IDTechEX Publication, 2016.
- [21] R. Singh, "Organic Electronics Market by Applications (Display, ORFID, OLED Lighting, Photo Voltaic, System Components-Global Opportunity Analysis and Industry Forecast", 2013-2020, Allied Market Research Organization, 2014.