

ارائه یک مدل مداری بهبود یافته بر اساس مقاومت سری وابسته به ولتاژ برای سلول خورشیدی آلی

علی خرمی^۱، مجتبی جودکی^۲

کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ali.khorami@stu.um.ac.ir

^۲دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، Joodaki@um.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک مدل مداری بهبود یافته بر اساس مدل تک دیودی برای سلول‌های خورشیدی آلی ارائه شده است. در مدل ارائه شده از یک مقاومت سری وابسته به ولتاژ استفاده شده است. ایده مقاومت سری وابسته به ولتاژ، در سلول‌های آلی، مبتنی بر قابلیت تحرک وابسته به میدان الکتریکی در مواد آلی است. از این رو ابتدا روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای استخراج پارامترهای اصلی مدل تک دیودی ارائه شده است. سپس مبانی فیزیکی این مقاومت سری وابسته به ولتاژ مدل شده است. بعد از آن برای استخراج مقاومت سری متغیر با ولتاژ الکتریکی نیز الگوریتمی جدید پیشنهاد گردیده است. برای ارزیابی مدل ارائه شده، روابط تحلیلی در نقاط مشخص و حده منحنی جریان-ولتاژ نظیر ولتاژ مدار باز به کار گرفته شده است. نشان داده شده است که فرض ثابت بودن مقاومت سری خطای زیادی در تعیین آن و محاسبات مبتنی بر آن دارد. در پایان این مدل بهبود یافته و الگوریتم‌های استخراج برای بررسی ۵ سلول خورشیدی آلی به کار گرفته شده است. استفاده از این مدل بهبود یافته دقت در مدل مداری سلول را افزایش داده است. به طوری که دقت برازش پارامترهای مداری با استفاده از مقاومت وابسته به ولتاژ استخراج شده با الگوریتم پیشنهادی به طور میانگین 10^6 برابر نسبت به برازش با مقاومت ثابت بهبود یافته است.

کلیدواژه

سلول خورشیدی آلی، مدل مداری، مقاومت سری وابسته به ولتاژ، استخراج پارامترهای مدل.

مقدمه

می‌باشد. استفاده از مولکول‌های کوچک^[۲, ۳]، درشت مولکول‌ها^[۴]، انواع پلیمرها^[۵]، ساختارهای پشته‌ای^[۶] که چند پیوند را شامل می‌شوند، ساختارهای سه‌گانه (Ternary)^[۷]، استفاده از نانو ساختارها^[۸]، نانو ذرات فلزی^[۹] (NP)، نانولوله‌های کربنی^[۱۰] (CNT)، رنگ دانه‌ها، گرافن^[۱۱]، نقاط کوانتومی^[۱۰]، استفاده از مواد جاذب (پروفوسکایت)^[۱۱, ۱۲] و استفاده از مواد آلی سنتز شده جدید، از این دست نوآوری‌ها هستند. در سلول‌های خورشیدی آلی اولیه با بازدهی کمتر از ۱٪ تنها یک لایه آلی در بین دو الکترود قرار گرفته بود (ساختار تک‌لایه). در سلول‌های بعدی چون جداسازی

اهمیت سلول‌های خورشیدی برای تولید انرژی پاک بر همگان روشن است و تحقیقات برای بهبود تولید انرژی از خورشید و کاهش هزینه تولید به صورت روز افزونی ادامه دارد. در این میان، به نظر می‌رسد سلول‌های خورشیدی آلی (OSCs) در آینده جایگاه ویژه‌ای داشته باشند. تولید ارزان، تولید با فناوری ساده^[۱]، انعطاف پذیری، وزن کم و امکان سنتز مواد با ساختار مولکولی دلخواه از مزایای این سلول‌ها است. نسل جدید سلول‌های خورشیدی فتوولتائی شامل طیف وسیعی از نوآوری‌های علمی و ایده‌های نو

Nanoparticles^۵
Carbon Nano Tube^۶
Graphene^۷
Quantum Dot^۸

Organic Solar Cells^۱
Small molecule^۲
Tandem^۳
Nano Structures^۴

سلول‌های آلی فتوولتائی را متحول کند که نمونه‌ای از آنها در [۱۹] و [۷] معرفی شده‌اند. نوآوری دیگر، استفاده از مواد با شکاف انرژی کوچک است که در [۲۰] بررسی شده است. برخلاف نظراتی که برای حد بالای بازدهی سلول‌های آلی در نظر گرفته می‌شد (حدود ۱۲٪)، کاستر و همکارانش نشان دادند که این سلول‌ها می‌توانند بازدهی حدود ۲۰٪ نیز داشته باشند [۲۱]. این افزایش بازدهی با استفاده از مواد با ضریب نفوذپذیری الکتریکی^۵ بزرگتر حاصل می‌شود. به این ترتیب با تابش نور به جای تشکیل اکسیژن مستقیم الکترون و حفره آزاد بوجود خواهد آمد و بازدهی سلول به شدت افزایش می‌یابد [۲۱].

مدل‌سازی و شبیه‌سازی سلول‌های آلی در پژوهش‌های زیادی بررسی شده است که مدل فیزیکی-الکتریکی یکی از معروف‌ترین آن‌ها است و بر پایه مدل رانش-پخش^۶ و مشتقات تصحیح شده آن برای مواد آلی بنا شده است [۲۲]. مدل مداری از این جهت که رفتار جریان ولتاژ سلول را نشان می‌دهد، مهم است. صفحات خورشیدی از ترکیب سری و موازی سلول‌های خورشیدی ساخته می‌شوند و استخراج دقیق پارامترهای الکتریکی سلول به شناخت دقیق آن‌ها منجر می‌شود. مدل‌های مداری سلول‌های آلی را معمولاً در سه دسته مدل‌های تک دیودی [۱۷]، مدل‌های مبتنی بر دو دیود [۲۳] و مدل‌های سه دیودی [۲۴]، می‌توان دسته بندی کرد. چون این مقاله به ارائه مدل مداری برای سلول خورشیدی آلی می‌پردازد، مدل‌سازی مداری به بخش بعد موكول شده است. مدل‌های حرارتی و مکانیکی نیز به شناخت رفتار سلول در شرایط آب و هوایی واقعی منجر می‌شوند.

در این مقاله یک مدل مداری تک دیودی بهبود یافته براساس مقاومت سری وابسته به ولتاژ ارائه شده است. با فرض ثابت بودن مقاومت سری، از الگوریتم ژنتیک برای استخراج پارامترهای اصلی مدل تک‌دیودی در ربع چهارم منحنی جریان-ولتاژ استفاده شده است. سپس با الگوریتم پیشنهادی که مبانی فیزیکی و ریاضی آن نیز در مقاله آمده است، مقاومت متغیر با ولتاژ برای ربع چهارم و اول استخراج شده است. علاوه بر این مبانی فیزیکی وابستگی این مقاومت

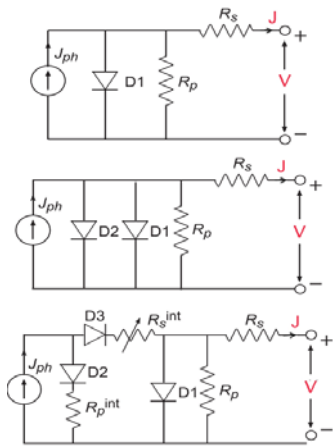
اکسیژن‌ها در یک لایه به سختی انجام می‌شد، از دو ماده فعال با اختلاف شکاف انرژی استفاده شد تا میدان الکتریکی حاصل به جداسازی اکسیژن‌ها کمک کند (ساختار دولایه). سلول پلیمری با پیوند ناهمگن حجمی (BHJ) پیشرفت بعدی بود. در این حالت پلیمر پذیرنده و دهنده با یکدیگر مخلوط شده و لایه فعال را تشکیل می‌دادند [۱۳]. چون طول پخش اکسیژن در مواد آلی کوچک است، مخلوط کردن مواد دهنده و پذیرنده مساحت فصل مشترک را به شدت افزایش می‌دهد و کمک می‌کند تا اکسیژن‌های بسیار بیشتری بتوانند به فصل مشترک برسند. در گام‌های بعدی از روش‌های مختلفی از جمله انتخاب حلال مناسب، انتخاب نسبت مواد و اصلاح فرآیند ساخت، و همچنین کنترل ریخت‌لایه فعال، بازدهی افزایش یافت [۱۴]. استفاده از مواد آلی پلی (۳-هگزیل تیوفن) (P3HT) و فولرن (فنیل-C₆₁-بوتریک اسید متیل استر) (PC61BM) بازدهی را به ۳/۵٪ رساند [۱۵]. برای سلول پشته‌ای نیز اتصال موازی سلول‌ها ارائه شده، که جریان اتصال کوتاه بزرگی معادل ۱۵/۱ mA/cm² و بازده توان ۴/۸٪ را نتیجه داده است [۶]. PCDTBT پلیمری بود که با استفاده از آن بازدهی ۳/۶٪ ثبت شد [۱۶] و افزودن یک لایه اکسید تیتانیوم به منظور بهبود جذب نوری، در سال ۲۰۰۹ بازدهی ۶/۳٪ را نتیجه داد. پلیمرهای بعدی که مبتنی بر واحدهای مولکولی^{۱۲} TT و^{۱۳} BD بود بازدهی سلول‌ها را تا ۸٪ بهبود دادند [۱۷، ۱۸]. بیشترین بازدهی ثبت شده برای سلول با یک پیوند در سال ۲۰۱۱ با بازدهی ۱۱/۱٪ ثبت شد [۲]. در سال ۲۰۱۲ نیز بالاترین بازدهی برای سلول پشته‌ای به مقدار ۱۳/۲٪ ثبت گردید تا امیدواری به اقتصادی شدن این فن‌آوری بیش از پیش افزایش یابد [۲]. حساسیت زیاد به عوامل محیطی و تنزل شیمیایی این سلول‌ها باعث شده است تا طول عمر و پایداری این سلول‌ها هنوز چالشی بر سر تجاری شدن آنها باشد.

البته امید می‌رود، ساختارهای جدید با استفاده از مواد سه‌تایی^۴ و ساختارهای سه‌گانه (در این ساختار سه ماده در هم آمیخته می‌شوند و جایگزینی برای سلول‌های پشته‌ای استاندارد محسوب می‌شوند) به‌توانند آینده

^{۱۳} Benzodithiophene
^{۱۴} Triplet
^{۱۵} Permittivity
^{۱۶} Drift-diffusion

^۹ Excitons
^{۱۰} Bulk heterojunction polymer
^{۱۱} Morphology
^{۱۲} Thieno[3,4-b]-thiophene

متناظر با بازترکیب عمیق در منطقه تجمع بار فضائی را نشان می‌دهد و معمولاً سه تا هفت مرتبه از جریان اشباع معکوس دیود بزرگتر است [۲۳]. در مدل مداری ارائه شده در [۲۶] نیز یک مقاومت سری داخلی متغیر پیشنهاد شده که الگوریتمی برای محاسبه آن ارائه نشده بود.



شکل ۱. مدل‌های مداری تک‌دیودی، دوددیودی و سه‌دیودی.

در [۳۵] نیز روشی تحلیلی برای استخراج پارامترهای مداری ارائه شده است. مزرهی^۸ مدل سه دیودی برای مدل‌سازی رفتار سلول آلی تحت تابش ارائه کرد که در شکل ۱-ج آمده است [۲۴]. در کارهای بعدی نیز مدل مداری معادل نسبتاً پیچیده‌تری برای تطبیق بهتر با سلول‌های پلیمری بررسی شده است [۲۸، ۳۳].

رابطه جریان-ولتاژ دیود در مدل شاکلی که برای سلول‌های آلی و غیرآلی استفاده شده است [۳۶، ۳۷]، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$J = J_0 \left(\exp\left(\frac{V - J R_s}{n V_T}\right) - 1 \right) + \frac{V - J R_s}{R_p} - J_{ph} \quad (1)$$

در این رابطه J ، V چگالی جریان و ولتاژ را نشان می‌دهد. J_{ph} چگالی جریان نوری، J_0 جریان اشباع معکوس دیود، R_s مقاومت سری، R_p مقاومت موازی، n ضریب ایده‌آلی و V_T ولتاژ حرارتی است. مولفه اول در معادله (۱) (جمله نمایی) نشان دهنده رفتار سلول خورشیدی در حالت تاریکی است. عبارت دوم $\left(\frac{V - J R_s}{R_p}\right)$ جریان نشتی سلول را مدل می‌کند که با J_p نشان داده می‌شود. در رابطه (۱) عبارت $V - J R_s$ ولتاژ اعمال شده به محل پیوند در لایه فعال را نشان می‌دهد.

در شکل ۱ منبع جریان J_{ph} ، جریان تحت تابش نور را

به ولتاژ اثبات شده است. برای ارزیابی مدل ارائه شده، روابط تحلیلی در نقاط مشخص منحني جریان-ولتاژ (ولتاژ مدارباز) به کار گرفته شده است. همخوانی مقاومت متغیر استخراج شده و مقاومت استخراج شده بصورت تحلیلی، بررسی شده است. در پایان برای ۵ سلول نمونه نشان داده شده است مدل بهبود یافته برازش بهتری به منحنی جریان-ولتاژ دارد. مدل پیشنهادی تطابق بهتری با واقعیت سلول‌های آلی دارد و مقاومت سری متغیر آن نیز با الگوریتم پیشنهادی قابل استخراج است.

در ادامه ابتدا مبانی مدل مداری تک دیودی سلول آلی بررسی شده است. سپس به استخراج پارامترهای مداری بر پایه الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است. در بخش بعد آن مبانی فیزیکی مقاومت سری متغیر با ولتاژ مدل سازی شده است. بعد آن نیز الگوریتمی برای استخراج مقاومت سری وابسته به ولتاژ ارائه گردیده است. در بخش پایانی پارامترهای مدل مداری سلول‌های ساخته شده، استخراج شده است و در نهایت نتایج مقاومت متغیر سری با مقاومت‌های سری با مقدار ثابت مقایسه و جمع بندی انجام شده است.

مدل مداری تک دیودی برای سلول آلی

مدل مداری علاوه بر سادگی می‌تواند درک فیزیکی و الکتریکی مناسبی از رفتار سلول ایجاد کند و برای توصیف رفتار سلول مفید است. البته این مدل به درک بهتر عوامل موثر بر عملکرد سلول نیز کمک می‌کند. علاوه بر این برای استفاده بهینه از سلول با توجه به شرایط محیطی متفاوت، مدل مداری نیز راه‌گشا است. مدل رایج برای سلول‌های خورشیدی غیرآلی مدل تک‌دیودی (مدل مبتنی بر رابطه شاکلی برای دیود) است که برای سلول‌های آلی نیز با محدودیت‌هایی پیشنهاد شده است (شکل ۱-الف) [۲۳، ۲۴]. البته برای مدل کردن پیچیدگی‌های حاکم بر سلول‌های آلی این مدل احتیاج به اصلاح و تعمیم دارد که کارهای پژوهشی زیادی به آن پرداخته‌اند [۱۷، ۳۵-۳۳]. مدل ارائه شده توسط چکنانه^۷ جریان تاریکی ناشی از سلول آلی را از دو پدیده متفاوت با مرتبه بزرگی متفاوت، با دو دیود تفکیک شده موازی در نظر گرفت (شکل ۱-ب) [۲۳]. در این مدل، دیود دوم چگالی جریان معکوس

^۸Mazhary

^۷Cheknaneh

جذب می‌کنند [۲۰]. ضریب جذب نوری بالا، کارایی بهتر فاز جداسازی، تحرک پذیری بالای حامل‌ها و تعاملات درون مولکولی از جمله عوامل بهبود جریان اتصال کوتاه می‌باشند [۴۰].

جریان نشتی در سلول خورشیدی با مقاومت R_p مدل می‌شود [۴۱]. مقاومت موازی R_p (شکل ۱) به علت بازترکیب حامل‌های بار در نزدیکی محل جداسازی (فصل مشترک دهنده/پذیرنده) ایجاد می‌شود. حتی می‌توان R_p را ناشی از بازترکیب بارها در فاصله‌ای دورتر از محل جداسازی یعنی در نزدیکی الکترود نیز در نظر گرفت. ثابت شده است که استفاده از لایه‌های واسط تحت شرایط خاص می‌تواند قابلیت گزینش حامل‌ها در مرز الکترودها و در نتیجه مقاومت موازی، را افزایش دهد. برای مثال استفاده از یک لایه نازک PEDOT روی ITO قابلیت تزریق حفره‌ها را بهبود می‌بخشد و یک لایه میانی LiF بین لایه فعال و الکترود آلومینیومی به تزریق بهتر الکترون‌ها و کاهش جریان نشتی کمک می‌کند. علاوه بر این پدیده، که مربوط به مرز واسط است، ویژگی‌های توده‌ای (حجمی) لایه فعال از جمله ریخت‌نیزی روی کاهش مکانیزم نشتی مقاومت موازی موثر است.

برای محاسبه مقاومت موازی ابتدا از رابطه (۱) نسبت به J مشتق گرفته شده است. در مشتق‌گیری با فرض ثابت بودن مقاومت سری رابطه زیر به دست می‌آید:

$$1 = -\frac{dJ_{ph}}{dJ} + J_0 \exp\left(\frac{V - JR_s}{nv_t}\right) \times \left(\frac{1}{nv_t} + \frac{1}{R_p}\right) \left(\frac{dV}{dJ} - R_s\right) \quad (۶)$$

اگر در (۶) $J = J_{sc}$ و $V = 0$ قرار داده شود و مشتق ولتاژ نسبت به جریان در نقطه $V = 0$ را R_{sc} بنامیم. پس از ساده‌سازی رابطه زیر برای محاسبه مقاومت موازی به دست می‌آید:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_{sc} - R_s} - \frac{J_0}{nv_t} \exp\left(\frac{-J_{sc}R_s}{nv_t}\right) \quad (۷)$$

در رابطه (۷) جمله $-\frac{J_0}{nv_t} \exp\left(\frac{-J_{sc}R_s}{nv_t}\right)$ قابل صرف‌نظر کردن است. زیرا J_0 اصولاً مقدار کوچکی است و جمله $\exp\left(\frac{-J_{sc}R_s}{nv_t}\right)$ نیز در جریان اتصال کوتاه مقدار کوچکی می‌شود. با نادیده گرفتن جمله‌نمایی در رابطه (۷)

نشان می‌دهد و با تعداد اکسیتون‌های جدا شده در واحد زمان برابر است. در سلول‌های خورشیدی آلی چگالی جریان نوری ایجاد شده به میدان وابسته است که می‌هایلیتچ^{۱۹} و همکارانش آن را برای P3HT:[C60]PCBM نشان دادند [۳۸]. در کار آنها همخوانی خوبی بین نتایج تجربی و مقدار محاسبه شده برای J_{ph} به عنوان تابعی از ولتاژ موثر اعمال شده وجود داشت. برخی مقالات آن را برای سلول‌های BHJ به صورت تحلیلی نیز بررسی کرده‌اند [۳۷]. جریان نوری را می‌توان از روی جریان اتصال کوتاه به دست آورد. برای این کار در رابطه (۱) باید $V = 0$ قرار دهیم و با استفاده از جایگذاری $J(V = 0) = J_{sc}$ داریم:

$$J_{ph} = -J_{sc} + J_0 \left(\exp\left(\frac{-J_{sc}R_s}{nv_t}\right) - 1 \right) - \frac{J_{sc}R_s}{R_p} \quad (۲)$$

که J_{sc} جریان اتصال کوتاه است و به راحتی از منحنی جریان-ولتاژ به دست می‌آید. برای محاسبه جریان نشتی اشباع معکوس دیودی (J_0) می‌توان از رابطه (۲) استفاده کرد. البته می‌توان از تقریب $R_p \gg R_s$ برای ساده سازی آن استفاده کرد:

$$J_0 = \frac{J_{ph} + J_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)}{\exp\left(\frac{-J_{sc}R_s}{nv_t}\right) - 1} \cong \frac{J_{ph} + J_{sc}}{\exp\left(\frac{-J_{sc}R_s}{nv_t}\right) - 1} \quad (۳)$$

برای محاسبه n در رابطه (۱) $J = 0$ و $V = V_{oc}$ قرار می‌دهیم:

$$J_0 \left(\exp\left(\frac{V_{oc}}{nv_t}\right) - 1 \right) - J_{ph} + \frac{V_{oc}}{R_p} = 0 \quad (۴)$$

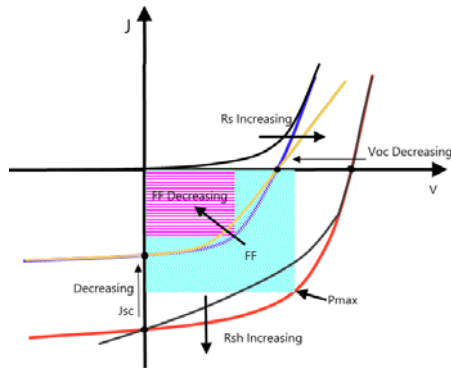
در این رابطه ولتاژ مدار باز سلول است. از رابطه (۴)، n به دست می‌آید:

$$n = \frac{V_{oc}/V_t}{\ln\left(\frac{J_{ph} + V_{oc}/R_p}{J_0} + 1\right)} \quad (۵)$$

n ضریب ایده آلی است که برای سلول‌های خورشیدی سیلیکانی بین ۱ و ۲ است، اما در سلول‌های آلی این ضریب می‌تواند بزرگتر از ۲ باشد [۳۲، ۳۹].

جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) معرف تعداد حامل‌های بار تولیدی و استخراج شده در اتصال الکترودها در شرایط اتصال کوتاه است. مواد با شکاف انرژی کوچک، جریان اتصال کوتاه بیشتری دارند زیرا طیف وسیع‌تری از نور را

پارامترهای مداری و الکتریکی سلول‌های خورشیدی آلی نظیر J_0 ، R_p و V_{oc} به نور وابسته هستند [۲۴]. بنابراین در



شکل ۲. نمودار J-V نوعی و تغییرات نسبی آن با پارامترهای مداری سلول‌های خورشیدی آلی برای دقت بیشتر محاسبه این پارامترها باید از منحنی J-V تحت تابش به دست آید. این پارامترها باید از منحنی J_{sc} و V_{oc} دو پارامتری هستند که به راحتی از منحنی جریان ولتاژ حاصل می‌شوند و با داشتن برخی از پارامترهای J_0 ، R_p ، R_s ، n و J_{ph} مابقی مجهولات را می‌توان از روابط (۳) تا (۵) محاسبه کرد. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک که یک بهینه‌ساز عمومی است، برای استخراج پارامترهای مداری استفاده شده است. در الگوریتم بکار گرفته شده از کروموزم متشکل از ۵ پارامتر مداری مطابق با شکل ۳ استفاده شده است. هدف بهینه‌سازی کمینه‌کردن تابع برازندگی مبتنی بر معیار خطای Mean Square Error (MSE) زیر است:

$$MSE = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P (J_k^{Mes} - J_k^{Cal})^2 \quad (11)$$

در رابطه بالا J_k^{Cal} جریان محاسبه شده، J_k^{Mes} جریان اندازه‌گیری شده و P تعداد نقاط اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. البته روابط (۳) تا (۵) نیز می‌تواند به عنوان معیاری برای صحت پارامترهای به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی استفاده شوند. از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای برآزش داده‌های جریان-ولتاژ در ربع چهارم و استخراج پارامترهای مداری استفاده شده است. رسم منحنی جریان-ولتاژ با پارامترهای استخراج شده و داده‌های تجربی، انطباق مناسبی در گستره‌ی ولتاژهای منفی کوچک تا ولتاژ مدار باز و کمی بیش‌تر را نشان می‌دهد، اما با افزایش ولتاژ (ربع اول)، این انطباق کم‌کم از بین رفته و خطای برآزش افزایش می‌یابد [۴۶]. علت عدم انطباق در ولتاژهای بالا این است

و ساده‌سازی می‌توان به رابطه تقریبی برای مقاومت موازی دست پیدا کرد.

$$R_p + R_s \cong R_{sc} = \left. \frac{dV}{dJ} \right|_{V=0} \quad (8)$$

شیب منحنی مشخصه جریان-ولتاژ در حالت اتصال کوتاه به عنوان مجموع مقاومت سری و موازی در نظر گرفته شده است که با تقریب $R_p \gg R_s$ همان R_p است.

$$R_p \cong R_{sc} \quad (9)$$

روابط (۸) و (۹) در برخی از مقالات برای محاسبه مقاومت موازی استفاده شده اند [۴۴-۴۲].

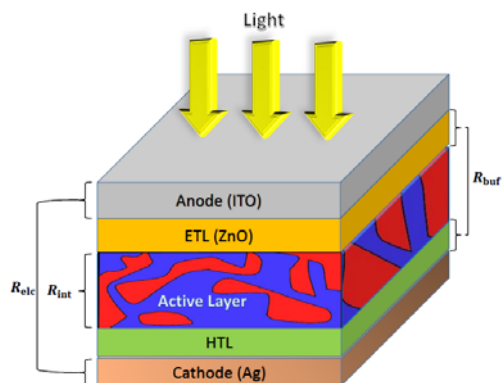
بهبود قابل توجه در کارایی، با افزایش J_{sc} ، افزایش V_{oc} و ضریب پر شدگی (FF) از طریق مهندسی مواد انجام شده است. البته چون به طور معمول افزایش V_{oc} باعث کاهش J_{sc} می‌شود (و برعکس) بهبود هر دو پارامتر با هم کاری دشوار است [۱۷]. ضریب پر شدگی از دیگر پارامترهایی است که معیاری برای بازدهی سلول به حساب می‌آید و میزان قائمه بودن کنج منحنی جریان-ولتاژ در ربع سوم را نشان می‌دهد (شکل ۲). از نظر ریاضی نسبت حداکثر توان قابل استخراج از سلول (P_{Max}) به حاصل ضرب جریان اتصال کوتاه در ولتاژ مدار باز، مقدار ضریب پر شدگی را نشان می‌دهد [۴۵].

$$FF = \frac{P_{Max}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (10)$$

مقاومت سری سلول، ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، مقاومت موازی و تحرک‌پذیری حامل‌های آزاد از جمله پارامترهای تاثیر گذار بر ضریب پر شدگی است. شکل ۲ میزان پر شدگی و نحوه تاثیر برخی از پارامترها بر منحنی جریان ولتاژ را نشان می‌دهد.

استخراج پارامترهای مداری

در سلول‌های خورشیدی به طور معمول منحنی جریان-ولتاژ حالت تاریکی را می‌توان برای استخراج ضریب ایده آلی (n)، جریان نشتی (J_0)، مقاومت موازی (R_p) و حتی مقاومت سری (R_s) استفاده کرد. در این روش از قضیه جمع آثار استفاده شده است، به این ترتیب که فرض شده است که منحنی جریان-ولتاژ تحت تابش از جمع منحنی جریان-ولتاژ تاریکی و جریان نوری (J_{ph})، که ثابت فرض شده است، به دست می‌آید. اما ثابت شده است که



شکل ۴. ساختار سلول‌های آلی تحت آزمایش

R_{int} مقاومت لایه فعال، R_{elec} مقاومت الکترودها و R_{buf} مقاومت لایه‌های میانی است. گوررو و همکارانش [۴۷] از طریق بررسی پاسخ فرکانسی سلول خورشیدی نشان دادند که مقاومت سری به فرایندهای انتقال ناحیه فعال بستگی دارد. آنها برای این کار، رابطه مقاومت سری با چگالی تله‌های فلورن افزوده شده را بررسی کردند. چون مقاومت لایه فعال (R_{int}) به قابلیت تحرک پلیمر بستگی دارد و از طرفی قابلیت تحرک مواد پلیمری نیز با افزایش ولتاژ، افزایش می‌یابد، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت لایه فعال با ولتاژ تغییر می‌کند. مقاومت الکترودها آلومینیومی (ماده معمول در الکترودها کاتد) معمولاً قابل صرف نظر است چرا که هدایت آلومینیوم حدود سه مرتبه بزرگی بیشتر از ITO (ماده معمول در ساخت الکترودها آند) است. بنابراین مقاومت الکترودها کاتد در مقابل آند قابل صرف نظر کردن است. برای مقاومت آند نیز می‌توان رابطه زیر را استفاده کرد [۴۱]:

$$R_{elec} = R_{anode} = \frac{W^2}{3\sigma_{anode} \cdot t_{anode}} \quad (13)$$

که W عرض سلول، t_{anode} ضخامت آند و σ_{anode} رسانایی آند را نشان می‌دهند.

مقاومت لایه‌های دیگر از جمله لایه‌های میانی به سادگی با داشتن ضخامت و هدایت آنها قابل محاسبه است که در بیشتر موارد به خاطر ضخامت کم (در حدود 1 nm) قابل صرف نظر کردن است.

$$R_{buf} = \frac{L_{buf}}{\sigma_{buf} A} \quad (14)$$

برای لایه بافر از جنس LiF مقاومت سری حدود ۱ Ω/cm^2 است [۵۱]. به طور مشابه برای لایه فعال نیز داریم:

که مقاومت سری در سلول‌های خورشیدی آلی ثابت نیست و در ولتاژهای مختلف متفاوت است.



شکل ۲. کروموزوم تشکیل شده از ژن‌های حقیقی (پارامترهای مداری)

در نتیجه در نظر گرفتن وابستگی مقاومت سری به ولتاژ به دقت مدل می‌افزاید. در هنگام برازش با الگوریتم ژنتیک، برای مقاومت سری نیز مقداری به دست می‌آید که آن را R_s^{GA} می‌نامیم، که حاصل برازش در ربع چهارم با فرض ثابت بودن آن است. در بخش بعد به مدل‌سازی مقاومت سری وابسته به ولتاژ ($R_s(V)$) پرداخته شده است.

مدل سازی مقاومت سری وابسته به ولتاژ

افزایش مقاومت سری باعث افت ولتاژ خروجی و کاهش کارایی سلول می‌شود. تحقیقات زیادی صورت گرفته است تا مقاومت سری را با استفاده از مواد بهتر [۴۰] و فن‌آوری ساخت مناسب‌تر [۴۱] کاهش دهند. از طرفی، در برخی از مقالات نیز ضرورت متغیر بودن مقاومت سری با ولتاژ مورد تاکید قرار گرفته است [۲۶، ۴۴، ۴۷]. از این رو در این بخش به مدل‌سازی مقاومت سری متغیر، بر اساس مبانی فیزیکی حاکم بر سلول خورشیدی آلی پرداخته شده است. عواملی نظیر قابلیت تحرک متغیر در مواد ارگانیک، تله‌ها [۴۸-۵۰] ناحیه فعال و پدیده بار فضائی [۴۸-۵۰] می‌تواند منجر به مدل مداری با مقاومت متغیر شود.

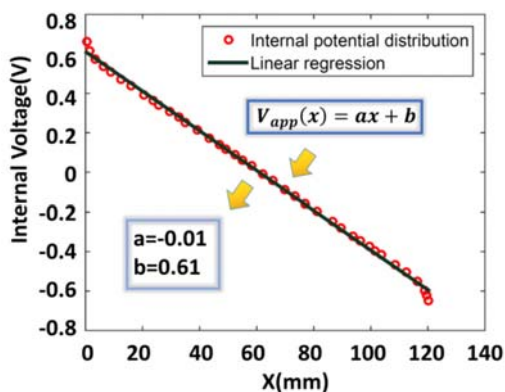
با توجه به ساختار سلول (شکل ۴)، مقاومت سری سلول را می‌توان مجموع مقاومت لایه‌های مختلف تشکیل دهنده آن از جمله لایه فعال، الکترودها، لایه‌های بافر و اتصالات مختلف در نظر گرفت [۴۷].

$$R_s = R_{elec} + R_{buf} + R_{int} \quad (12)$$

با استفاده از روابط (۱۵) تا (۱۷) و با در نظر گرفتن $E = a$ در آن‌ها، معادله‌ی کلی برای مقاومت سری لایه‌ی فعال در سلول آلی به دست می‌آید:

$$R_{int} = \frac{L_{active}}{2qn(\mu_0) \exp(\gamma E^{0.5})} \quad (20)$$

برای سلول‌های BHJ با توجه به اینکه لایه‌ی فعال از دو ماده‌ی ترکیب شده با قابلیت تحرک متفاوت تشکیل شده است، احتیاج به میانگین روی قابلیت تحرک است (چون دو ماده با قابلیت تحرک متفاوت آمیخته شده است). به همین دلیل از $\langle \mu_0 \rangle$ بجای μ_0 استفاده شده است.



شکل ۵. توزیع پتانسیل داخلی برای یک سلول نمونه

استخراج مقاومت سری وابسته به ولتاژ

مدل کردن مقاومت سری متغیر در بخش قبل مطرح شد، اما استخراج این مقاومت از روی داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی منحنی جریان-ولتاژ در ادامه این بخش انجام خواهد شد. همانطور که در بخش قبل گفته شد، در حقیقت، مقاومت R_s متأثر از هدایت ماده و تحرک‌پذیری حامل‌های بار در محیط‌های انتقال دهنده متناظرشان است، و همچنین قابلیت تحرک تحت تاثیر عوامل مختلف دیگری مثل بارهای فضایی، میدان الکتریکی و تله‌ها نیز است [۲۶]. در تئوری مدارهای الکتریکی برای هر المان مداری که ولتاژ آن تابعی از جریان است و یا برعکس، می‌توان مقاومت دینامیکی را به صورت مشتق ولتاژ بر حسب جریان بیان کرد. سه نقطه مشخص در منحنی جریان-ولتاژ سلول وجود دارند که در ادامه علاقه‌مند به محاسبه مقاومت سری در این نقاط هستیم. این نقاط عبارتند از ولتاژ مدار باز (V_{oc})، ولتاژ نقطه معادل توان بیشینه (V_{mp}) و ولتاژهای خیلی بالا (V_{∞}). اهمیت نقطه V_{oc} در این است که می‌توان مقاومت

$$R_{int} = \frac{L_{active}}{\sigma_{active}^4} \quad (15)$$

رابطه رسانایی برای ناحیه‌ی فعال به صورت زیر بیان

می‌شود:

$$\sigma_{active} = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (16)$$

که در آن قابلیت تحرک مواد آلی به تغییرات میدان وابسته است. رابطه‌ی ارائه شده توسط پول-فرنکل^{۲۳} وابستگی قابلیت تحرک به میدان را برای مواد آلی به صورت زیر بیان می‌کند [۴۵]:

$$\mu(E) = \mu_0 \exp(\gamma E^{0.5}) \quad (17)$$

که در آن μ_0 قابلیت تحرک در غیاب میدان و γ

ضریب پول-فرنکل می‌باشد. در رابطه (۱۷) ضریب پول-فرنکل بصورت زیر نوشته می‌شود [۴۵]:

$$\gamma = \frac{q^{0.5}}{2V_T \sqrt{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (18)$$

در این رابطه ϵ_r ضریب نفوذپذیری خلا و ϵ_r ضریب نفوذپذیری نسبی ماده است و V_T ولتاژ گرمایی است. رابطه (۱۷) وابستگی قابلیت تحرک مواد پلیمری به میدان الکتریکی را مدل می‌کند. برای استفاده از این رابطه احتیاج به محاسبه میدان الکتریکی است که با توجه به ولتاژ اعمالی به سلول تعیین می‌شود. برای محاسبه توزیع ولتاژ از مدل رانش-پخش اصلاح شده برای سلول‌های BHJ آلی استفاده شده است. همچنین برای گسسته‌سازی و پیاده‌سازی، مدل مرجع [۵۲] و پارامترهای آن به کار گرفته شده است. شکل ۴ توزیع پتانسیل داخلی را برای یک سلول آلی نمونه با استفاده از این شبیه‌سازی یک بعدی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تقریب خطی برای این توزیع (به غیر از نقاط خیلی نزدیک به الکترودها) تقریب مناسبی است. با فرض توزیع پتانسیل روی سلول به صورت خطی، می‌توان رابطه‌ی زیر را برای ولتاژ اعمالی به سلول نوشت:

$$V_{app}(x) = ax + b \quad (19)$$

در این رابطه x محور عمود بر سطح سلول را نشان

می‌دهد و a و b با توجه به شرایط مرزی مشخص می‌شوند. چون میدان الکتریکی از مشتق ولتاژ به دست می‌آید، می‌توان نتیجه گرفت که $E = a$.

نتایج برازش خطی برای ضرایب a و b نیز در شکل ۴

آمده است.

^{۲۳} Poole - Frenkel

مقاومت سری وابسته به ولتاژ را در هر نقطه‌ای استخراج کرد.

الگوریتم WRA

اگر در رابطه (۱) جمله جریان نشستی (J_p) و جریان نوری (J_{ph}) را از جریان سلول کم کنیم، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$J' = J_0 \left(\exp\left(\frac{V - JR_s}{nV_t}\right) - 1 \right) \quad (25)$$

که در آن $J' = J - J_{ph} - J_p$ است. با گرفتن لگاریتم و ساده‌سازی از دو طرف رابطه (۲۵) و مشتق‌گیری نسبت به J' رابطه (۲۶) حاصل می‌شود:

$$\frac{1}{\frac{dV}{dJ'} - R_s} \cong \frac{1}{nV_t} \left(\frac{J_0}{J'} + 1 \right) \quad (26)$$

در رابطه بالا با در نظر گرفتن این واقعیت که $\frac{J'}{J_0} \gg 1$ است و ساده‌سازی، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$J' \frac{dV}{dJ'} \cong R_s J' + nV_t \quad (27)$$

رابطه (۲۷) نشان می‌دهد که اگر $J' \frac{dV}{dJ'}$ مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده برحسب جریان اندازه‌گیری رسم شود، شیب خط حاصل، R_s را نشان می‌دهد. چون در به دست آوردن رابطه (۲۷) از تقریب‌های ذکر شده در بالا استفاده شده است، این شیب فقط برای تعداد نقاط اندکی حول نقطه اندازه‌گیری ثابت است. به عبارت دیگر این شیب با افزایش ولتاژ اعمال شده به سلول تغییر می‌کند. لذا اگر با افزایش ولتاژ اعمال شده برحسب جریان $J' \frac{dV}{dJ'}$ حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده برحسب جریان اندازه‌گیری رسم شود و برازش خطی حول نقطه مورد نظر برای N نقطه قبل و بعد رسم شود، شیب این خط R_s را حول همان نقطه نشان می‌دهد.

$$R_s^{\text{var}}(V_i) = m_{\text{reg}} \left(J' \frac{dV}{dJ'}, J' \right) \Big|_{(2N+1)} \quad (28)$$

این رابطه، برازش در یک پنجره لغزان از ولتاژهای کم تا ولتاژهای زیاد را نشان می‌دهد که در آن V_i ولتاژ نقطه نام را نشان می‌دهد. به این ترتیب $R_s^{\text{var}}(V_i)$ به ازای V_i مختلف و در یک پنجره محدود به دست می‌آید. شکل ۵ مفهوم برازش در یک پنجره محدود را برای یکی از

سری سلول را در این نقطه به صورت تحلیلی و دقیق به دست آورد که در رابطه (۲۳) آمده است. اهمیت نقطه V_{mp} نیز در این است که مقاومت سری در این نقطه برای تحلیل سلول در نقطه کاری بهینه مورد نیاز است. نقطه V_{oc} ، مقاومت سری حدی و تقریباً ثابت را در ولتاژهای بالا به دست می‌دهد.

$$R_{oc} = \frac{dV}{dJ} \Big|_{V=V_{oc}}, R_{mp} = \frac{dV}{dJ} \Big|_{V=V_m}, R_{\infty} = \frac{dV}{dJ} \Big|_{V \rightarrow \infty} \quad (21)$$

واضح است که این مقاومت‌های دینامیکی را می‌توان با تقریب به عنوان مقاومت سری سلول خورشیدی در نظر گرفت [۱۳، ۱۴].

در ادامه، برای مقاومت سری متغیر با ولتاژ ($R_s(V)$) در نقطه مدار باز رابطه تحلیلی به دست آمده است. برای این منظور، از رابطه (۱) با فرض متغیر بودن $R_s(V)$ ، نسبت به J مشتق گرفته می‌شود:

$$1 = J_0 \exp\left(\frac{V - JR_s}{nV_t}\right) \times \quad (22)$$

$$\times \left(\frac{1}{nV_t} + \frac{1}{R_p} \right) \left(\frac{dV}{dJ} - R_s - J \frac{dV}{dJ} \frac{dR_s}{dV} \right)$$

اگر رابطه (۲۲) را در نقطه مدار باز ($V=V_{oc}$ و $J=0$) در نظر بگیریم، با کمی دستکاری جبری و استفاده از رابطه (۲۱)، $R_s(V)$ به صورت معادله (۲۳) می‌شود.

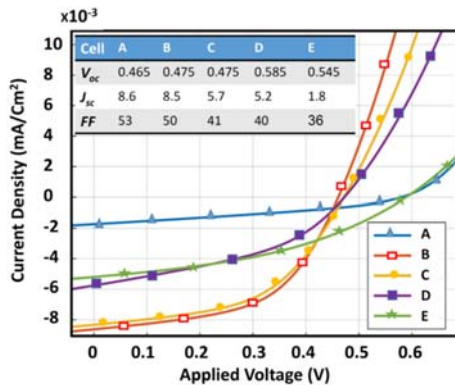
$$R_s^{oc} = R_s(V_{oc}) = R_{oc} - \frac{1}{\frac{J_0}{nV_t} \exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_t}\right) - \frac{1}{R_p}} \quad (23)$$

معادله (۲۳) یک فرمول بسته برای محاسبه $R_s(V)$ در نقطه مدار باز (V_{oc}) ارائه می‌دهد. البته استفاده از رابطه (۲۲) برای نقطه معادل توان بیشینه (V_{mp}) به یک رابطه بسته منجر نمی‌شود، زیرا در رابطه (۲۲) جمله $\frac{dR_s}{dV}$ حذف نمی‌شود. در این حالت رابطه (۲۱) را می‌توان به عنوان تقریبی برای مقاومت سری در نقطه توان بیشینه، R_s^{mp} ، به کار گرفت:

$$R_s^{mp} = R_s(V_{mp}) \cong R_{mp} = \frac{dV}{dJ} \Big|_{V=V_m} \quad (24)$$

البته این تقریب همیشه ممکن است دقیق نباشد. هیچکدام از این روابط تحلیلی امکان استخراج مقاومت سری وابسته به ولتاژ را فراهم نمی‌کند، لذا در ادامه الگوریتمی پیشنهاد شده است که با استفاده از آن می‌توان

پلیمر از حلال‌های مناسب استفاده شده است. جدول ۱ مواد به‌کار رفته در لایه فعال این پنچ سلول را به همراه حلال‌های آنها نشان می‌دهد. ماده^{۲۹} P3HT که پلیمری دهنده است در این سلول‌ها نیز به‌کار گرفته شده است. C₆₀ و PC₆₁BM^{۳۰} که از مشتقات C₆₀ است به‌عنوان پذیرنده استفاده شده‌اند و از انواع فلورن^۱ هستند. حلال‌های به‌کار رفته در فرآیند ساخت سلول کلروفتالن کلروبنزن (Cl-3)^{۳۱} و (naph:CB)^{۳۲}، متیل نفتالن:کلروبنزن^{۳۳} (M-naph:CB) و دی‌کلروبنزن^{۳۴} (ODCB) بوده‌اند.



شکل ۷. منحنی جریان ولتاژ ۵ سلول اندازه‌گیری شده [۴۴].

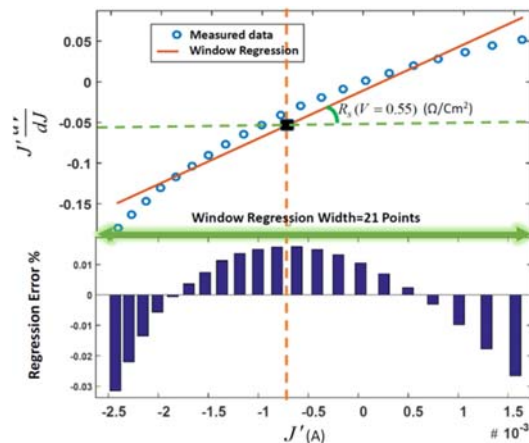
منحنی جریان-ولتاژ اندازه‌گیری شده این پنچ سلول در شرایط AMG1.5 در نمودار شکل ۷ آورده شده است. در شکل ۷ علاوه بر منحنی جریان-ولتاژ اندازه‌گیری شده مقادیر V_{oc} و J_{sc} که به راحتی از روی نمودار به دست آمده‌اند و همچنین FF که با توجه به توان بیشینه و مقادیر بدست آمده قابل محاسبه است، ارائه شده است.

در این بخش ابتدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مقادیر پنج پارامتر J_0 ، R_p ، R_s^{GA} ، n و J_{ph} را برای پنچ سلول مورد آزمایش محاسبه می‌کنیم. برای برازش در این مرحله، فقط از داده‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه ربع چهارم استفاده شده است (این کار سبب بالا رفتن دقت پارامترهای استخراج شده می‌شود). در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، جمعیت اولیه (جمعیت نسل) ۳۵ کروموزم انتخاب شده است که قابل تغییر است و عملگرهای

سلول‌های خورشیدی مورد آزمایش نشان می‌دهد. این الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم برازش پنجره یا WRA نامیده می‌شود. از WRA برای محاسبه مقاومت وابسته به ولتاژ پنچ سلول تحت آزمایش استفاده شده است که نتایج آن در بخش نتایج استخراج ارائه شده است.

نتایج شبیه سازی

برای مقایسه الگوریتم استخراج مقاومت سری وابسته به ولتاژ که در بخش قبلی ارائه شد، از منحنی جریان-ولتاژ پنچ سلول متفاوت استفاده شده است که ساختار داخلی این سلول‌ها در شکل ۶ آمده است. در این سلول‌ها الکترو



شکل ۶. برازش در پنجره محدود مطابق با رابطه (۲۷) برای محاسبه مقاومت سری وابسته به ولتاژ

جدول ۱. مواد بکار رفته در ناحیه فعال و حلال آن‌ها [۴۴]

سلول	مواد تشکیل دهنده	حلال	نورد ^{۲۶}
A	P3HT:C ₆₀	Cl-naph:CB	No
B	P3HT:C ₆₀	M-naph:CB	No
C	P3HT:C ₆₀	ODCB	Yes
D	P3HT:PC ₆₁ BM	ODCB	No
E	P3HT:C ₆₀	ODCB	No

کاتد از آلومینیوم تشکیل شده است، اما برای الکترو آند از ITO استفاده شده است که شفاف است و نور را از خود عبور می‌دهد. دو لایه PEDOT:PSS و LiF، لایه‌های بافر هستند و تزریق بار به دو الکتروود را کنترل می‌کنند. لایه فعال از به هم آمیخته شدن دو ماده پلیمری به‌عنوان دهنده^{۳۷} و پذیرنده^{۳۸} بوجود می‌آید، که برای ترکیب این دو

^{۲۰} [6,6]-phenyl-C61-butyracacidmethylester
^{۳۱} Fullerene
^{۳۲} 1-Chloronaphtalene:Chlorobenzene
^{۳۳} 1-Methylnaphtalene:Chlorobenzene
^{۳۴} 1,2-Dichlorobenzene

^{۲۵} Window Regression Algorithm
^{۲۶} Annealed
^{۲۷} Donor
^{۲۸} Acceptor
^{۲۹} poly(3-hexylthiophene)

برای سلول‌های آزمایش شده، مقاومت‌های استخراج شده نشان می‌دهند که رابطه $R_{mp} > R_{oc} > R_{\infty}$ برقرار است. در جدول ۳ برای مقایسه بهتر، مقاومت سری استخراج شده با الگوریتم ژنتیک نیز در ردیف آخر آمده است و برای آن نیز رابطه $R_{mp} > R_s^{GA} > R_{\infty}$ برقرار است. در نهایت الگوریتم WRA پیشنهادی برای استخراج مقاومت سری پنج سلول مورد نظر استفاده شده است. نمودارهای شکل ۸ نتایج استخراج مقاومت سری وابسته به ولتاژ، با الگوریتم WRA را نشان می‌دهد که برای مقایسه بهتر مقاومت‌های جدول ۳ نیز بر روی نمودار شکل ۸ آمده‌اند. برای نمایش بهتر، مقادیر مقاومت سری به صورت لگاریتمی داده شده است.

جدول ۳. مقایسه مقاومت‌های سری محاسبه شده

$R_s(\Omega/cm^2)$	A	B	C	D	E
R_{mp}	47	41	81	68	300
R_{oc}	8	10	11	25	30
R_{∞}	1.2	2.1	3.3	1.8	4.5
R_s^{oc}	8	10	11	25	30
R_s^{GA}	4.5	6.9	6.4	15	6.5

شکل ۸ همان روند کاهش مقاومت سری را با تغییر ولتاژ نشان می‌دهد که در جدول ۳ نیز دیده شده بود. علاوه بر این، هم‌خوانی خوبی بین مقاومت سری استخراج شده توسط الگوریتم WRA ($R_s(V_{oc})$) و مقاومت استخراج شده از رابطه (۲۳) (R_s^{oc})، در نقطه مدار باز برای هر ۵ سلول مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که ولتاژ مدار باز تنها نقطه‌ای است که مقاومت سری در آن به صورت تحلیلی و دقیق به دست آمد. بنابراین برابری این دو مقدار خود دلیلی بر درستی روش استخراج WRA برای مقاومت سری است ($R_s(V_{oc}) = R_s^{oc}$). در شکل ۸ این هم‌خوانی برای مقاومت سری استخراج شده در نقطه توان بیشینه، از روش WRA ($R_s(V_{mp})$) و رابطه (۲۱-الف) (R_{mp}) کمتر دیده می‌شود و دلیل آن این است که مقاومت R_{mp} تنها مقاومت دینامیکی در این نقطه است (نه دقیقاً مقاومت سری). از طرف دیگر رابطه (۱۲) بیان می‌کند که مقاومت سری سلول از مکانیزم‌های مقاومتی لایه‌های مختلف تشکیل شده است که برخی از آنها ثابت و برخی متغیر با ولتاژ هستند. در نتیجه مقاومت سری سلول را می‌توان متشکل از یک جز

انتخاب مسابقه‌ای^{۳۵}، دورگه‌سازی تک‌نقطه‌ای^{۳۶}، جهش^{۳۷} تک‌ژنی و نخبه‌گرایی^{۳۸} برای آن استفاده شد. نتایج استخراج پنج پارامتر اصلی و خطای MSE برازش در جدول ۲ آمده است. در این جدول، سلول A دارای کمترین مقاومت سری در میان سلول‌هاست. چون همه سلول‌ها دارای ساختار و مساحت یکسان هستند، تحرک پذیری بالاتر در لایه فعال این سلول را می‌توان عامل این مساله دانست. بزرگی ضریب ایده‌آلی (n) را می‌توان به افزایش سطح موثر فصل مشترک مواد دهنده و گیرنده در مخلوط پلیمر و فلورن تعبیر کرد [۵۳].

جدول ۲. پارامترهای استخراج شده با استفاده از الگوریتم برازش GA

Cells	A	B	C	D	E
$J_0(\mu A)$	1.52	4.4	13	27.4	0.97
n	3.2	2.5	3.3	4.6	3.2
$I_{ph}(mA)$	8.7	8.5	5.9	5.4	1.8
$R_p(\Omega)$	310	340	194	370	514
$R_s^{GA}(\Omega)$	4.5	6.9	6.4	15	6.5
MSE	2.5e-8	1.3e-8	5.3e-9	1e-9	1.1e-7

سلول D بیشترین مقدار n را دارد (مطابق جدول ۲)، که از حلالیت بیشتر PC₆₁BM نسبت به C₆₀ ناشی می‌شود. این حلالیت بالا سبب درهم فرو رفتگی بیشتر ماده دهنده و پذیرنده شده و سطح موثر فصل مشترک بیشتر را به دنبال دارد. مقایسه دو سلول C و E نشان می‌دهد که فرآیند بازپخت (حرارت دهی و خنک کردن با دما و مدت مناسب) منجر به بهبود کارایی سلول (برای مثال معیار FF) شده است. فرآیند بازپخت، بلورینگی لایه فعال را بهبود می‌دهد و به تبع آن تحرک پذیری بهتر می‌شود. به نظر می‌رسد جابجایی طیف جذب به سمت طول موج‌های نور قرمز، وضعیت جذب را نیز بهبود داده است. به همین خاطر جریان نوری (J_{ph}) افزایش یافته و مقاومت سری آن کاهش یافته است. مقاومت بیشتر سلول E نشان دهنده جریان نشستی کمتر آن نسبت به بقیه سلول‌هاست. در ادامه با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۳) مقادیر مقاومت سری برای پنج سلول مورد آزمایش محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۳ مشاهده می‌شود. جدول ۳ نشان می‌دهد که R_{oc} (رابطه ۲۱) با تقریب خوبی همان مقاومت سری در نقطه مدار باز (R_s^{oc}) است. علاوه بر این با افزایش ولتاژ مقاومت‌های R_{oc} ، R_{mp} و R_{∞} روندی کاهشی دارند. به عبارت دیگر

^{۳۷} Mutation
^{۳۸} Elitism

^{۳۵} Tournament selection
^{۳۶} Single point crossover

تقریب، مقاومت داخلی سلول را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد.

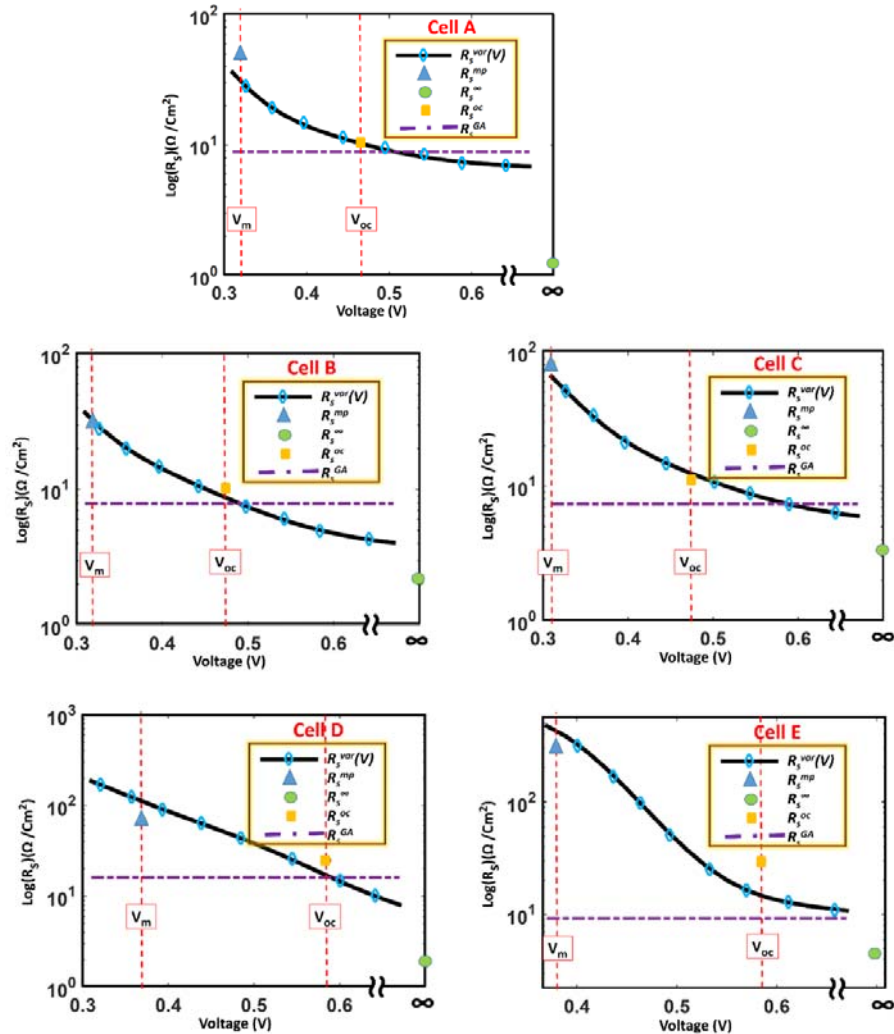
$$R_{int} \cong R_s^{var}(V) = R_s - R_s^{fix} \quad (30)$$

با توجه به منحنی‌های شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مقاومت سری در ولتاژهای بالا، بسیار کم شده و به مقداری ثابت همگرا می‌شوند ($R_s(\infty)$). اگر با تقریب این مقدار را همان جز ثابت در رابطه (۲۹) به حساب آوریم،

سری ثابت (R_s^{fix}) و یک جز سری متغیر ($R_s^{var}(V)$) در نظر گرفت:

$$R_s(V) = R_s^{fix} + R_s^{var}(V) \quad (29)$$

اگر سلول خورشیدی دارای سطح بزرگی باشد چون مقاومت الکتروود بزرگ می‌شود می‌توان این جز ثابت را با تقریب همان مقاومت الکتروود (و مقاومت اهمی مسیر عبور جریان) به حساب آورد ($R_{elec} \cong R_s^{fix}$). در این حالت با



شکل ۸: مقاومت سری وابسته به ولتاژ استخراج شده برای پنج سلول مورد آزمایش

در این جدول دقت برازش برای داده‌های جریان-ولتاژ در ربع اول و چهارم برای هر پنج سلول مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که به‌طور میانگین دقت معیار MSE در حدود 10^6 مرتبه بهتر شده است. در نهایت می‌توان مدل تک دیودی را با مقاومت سری وابسته به ولتاژ اصلاح کرد

رابطه (۳۱) به‌دست می‌آید:

$$R_{int} \cong R_s - R_s(\infty) \quad (31)$$

برای نشان دادن صحت نتایج، خطای مقادیر استخراج شده با استفاده از مقاومت سری وابسته به ولتاژ و مقاومت ثابت، در جدول ۴ آمده است.

که در شکل ۹ نشان داده شده است.

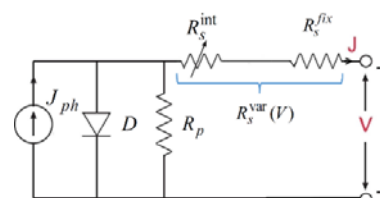
الگوریتم ژنتیک با استفاده از برازش منحنی جریان-ولتاژ، این پارامترها را برای پنج سلول آزمایش شده محاسبه کرد (جدول ۱). سپس مقادیر مقاومت‌های دینامیکی R_{mp} ، R_{oc} و R_{sc} که معمولاً به‌عنوان مقاومت سری در مقالات دیگر استفاده می‌شوند نیز محاسبه شدند، که نشان می‌داد فقط مقاومت R_{oc} با مقاومت سری در نقطه مدار باز هم‌خوانی دارد.

البته در محاسبه مقاومت دینامیکی R_{oc} ، چالش اصلی دقت در اندازه‌گیری جریان در نقطه مدار باز است. زیرا در نقطه مدار باز جریان به سمت صفر میل می‌کند و خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری در مقایسه با خود جریان، قابل چشم پوشی نیست. این خطا سبب می‌شود که محاسبه مشتق $\left. \frac{dV}{dJ} \right|_{V=V_{oc}}$ دقیق نباشد و به این ترتیب ممکن است خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری در جریان‌های کوچک باعث افزایش خطا در محاسبه رابطه تحلیلی (۲۳) شود.

در الگوریتم WRA پیشنهادی، از محاسبه شیب خط برازش، با پنجره‌ای به طول ۲۱ ($N=10$) نقطه متوالی، مقاومت سری متغیر بدست آمد. در مقاومت سری استخراج شده به وضوح وابستگی به ولتاژ $R_s(V)$ و روند کاهشی مقاومت سری برای پنج سلول آزمایش شده قابل رویت است. این مقاومت استخراج شده متغیر با ولتاژ برای مدار معادل اصلاح شده سلول خورشیدی آلی استفاده می‌شود. برای پنج سلول مورد آزمایش، مقایسه مقاومت سری استخراج شده از الگوریتم پیشنهادی و روش‌های قدیمی دقت این الگوریتم را نشان می‌دهد. برازش برای داده‌های جریان-ولتاژ در ربع اول و چهارم برای هر پنج سلول نشان می‌دهد که به‌طور میانگین دقت معیار MSE در حدود 10^{-6} مرتبه بهتر شده است. در نهایت یک مدل تک دیودی با مقاومت سری متغیر برای سلول‌های آلی ارائه شده است.

جدول ۴: مقایسه دقت برازش با فرض مقاومت سری ثابت و متغیر

خطای برازش (MSE)	برازش در ربع اول و چهارم برای مقاومت سری ثابت	برازش در ربع اول و چهارم برای مقاومت سری متغیر	برازش در ربع اول و چهارم برای مقاومت سری متغیر
سلول A	2.5e-8	2.1e-2	1.5e-10
سلول B	1.3e-8	8.6e-3	1.2e-10
سلول C	5.3e-9	5.7e-4	3.7e-10
سلول D	1e-9	1.0e-2	7.6e-12
سلول E	1.1e-7	6.5e-5	1.3e-11
میانگین خطا	2e-8	8e-3	1.3e-10



شکل ۹: مدل تک دیودی اصلاح شده برای سلول خورشیدی آلی

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا با استفاده از روابط تحلیلی ساده نشان داده شده است که مقاومت سری وابسته به ولتاژ است. سپس الگوریتم جدیدی بر پایه برازش پنجره‌ای (WRA) برای استخراج مقاومت سری وابسته به ولتاژ، ارائه شد. برای بررسی نتایج نیز مقاومت سری در نقطه مدار باز (با فرض وابستگی مقاومت سری به ولتاژ) به‌صورت تحلیلی محاسبه شد. چون برای محاسبه مقاومت سری مدار باز (R_s^{oc}) به دیگر پارامترها $(J_{ph}, n, R_s, R_p, J_0)$ نیاز داریم، روابط تحلیلی و تقریبی برای محاسبه آنها نیز در بخش دوم مقاله ارائه شد. علاوه بر این یک الگوریتم بهینه‌ساز مبتنی بر

مراجع

[2] A. Hagfeldt and M. Grätzel, "Molecular photovoltaics," *Accounts of Chemical Research*, vol. 33, pp. 269-277, 2000.
 [3] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, and H. Pettersson, "Dye-sensitized solar cells," *Chemical reviews*, vol. 110, pp. 6595-6663, 2010.

[1] G. A. dos Reis Benatto, B. Roth, M. Corazza, R. R. Sondergaard, S. A. Gevorgyan, M. Jørgensen, and Frederik C. Krebs, "Roll-to-roll printed silver nanowires for increased stability of flexible ITO-free organic solar cell modules," *Nanoscale*, vol. 8, pp. 318-326, 2016.

- Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, vol. 16, pp. 1517-1527, 2010.
- [16] N. Blouin, A. Michaud, and M. Leclerc, "A low-bandgap poly (2, 7-carbazole) derivative for use in high-performance solar cells," *Advanced Materials*, vol. 19, pp. 2295-2300, 2007.
- [17] H.-Y. Chen, J. Hou, S. Zhang, Y. Liang, G. Yang, Y. Yang, et al., "Polymer solar cells with enhanced open-circuit voltage and efficiency," *Nature photonics*, vol. 3, pp. 649-653, 2009.
- [18] Y. Liang, Y. Wu, D. Feng, S.-T. Tsai, H.-J. Son, G. Li, L. Yu, "Development of new semiconducting polymers for high performance solar cells," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, pp. 56-57, 2008.
- [19] Y. Shao and Y. Yang, "Efficient organic heterojunction photovoltaic cells based on triplet materials," *Advanced Materials*, vol. 17, pp. 2841-2844, 2005.
- [20] Q. Peng, T. Liang, and K. Feng, "Design of Low Bandgap Conjugated Polymers for Organic Solar Cell Application," 2013.
- [21] L. Koster, S. E. Shaheen, and J. C. Hummelen, "Pathways to a new efficiency regime for organic solar cells," *Advanced Energy Materials*, vol. 2, pp. 1246-1253, 2012.
- [22] G. A. Buxton and N. Clarke, "Computer simulation of polymer solar cells," *Modelling and simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 15, p. 13, 2006.
- [23] A. Cheknane, H. S. Hilal, F. Djeflal, B. Benyoucef, and J.-P. Charles, "An equivalent circuit approach to organic solar cell modelling," *Microelectronics Journal*, vol. 39, pp. 1173-1180, 10// 2008.
- [24] B. Mazhari, "An improved solar cell circuit model for organic solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 1021-1033, 5/5/ 2006.
- [25] K. Bouzidi, M. Chegaar, and A. Bouhemadou, "Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, pp. 1647-1651, 11/6/ 2007.
- [26] P. Junsangri and F. Lombardi, "Modelling and extracting parameters of organic solar cells," *Electronics Letters*, vol. 46, pp. 1462-1464, 2010.
- [27] B. Romero, G. del Pozo, and B. Arredondo, "Exact analytical solution of a two diode circuit model for organic solar cells showing S-shape using Lambert W-functions," *Solar Energy*, vol. 86, pp. 3026-3029, 2012.
- [28] A. Gaur and P. Kumar, "An improved circuit model for polymer solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, pp. 937-948, 2014.
- [29] L. Zuo, J. Yao, H. Li, and H. Chen, "Assessing the origin of the S-shaped I-V curve in organic
- [4] F. Odobel, Y. Pellegrin, and J. Warnan, "Bio-inspired artificial light-harvesting antennas for enhancement of solar energy capture in dye-sensitized solar cells," *Energy & Environmental Science*, vol. 6, pp. 2041-2052, 2013.
- [5] G. Li, R. Zhu, and Y. Yang, "Polymer solar cells," *Nature Photonics*, vol. 6, pp. 153-161, 2012.
- [6] S. Sista, Z. Hong, M. H. Park, Z. Xu, and Y. Yang, "High-efficiency polymer tandem solar cells with three-terminal structure," *Advanced Materials*, vol. 22, 2010.
- [7] T. Ameri, P. Khoram, J. Min, and C. J. Brabec, "Organic ternary solar cells: a review," *Advanced Materials*, vol. 25, pp. 4245-4266, 2013.
- [8] E. L. Lim, C. C. Yap, M. A. M. Teridi, C. H. Teh, A. R. bin Mohd Yusoff, and M. H. H. Jumali, "A review of recent plasmonic nanoparticles incorporated P3HT: PCBM organic thin film solar cells," *Organic Electronics*, vol. 36, pp. 12-28, 2016.
- [9] W. C. Choy and X. Ren, "Plasmon-electrical effects on organic solar cells by incorporation of metal nanostructures," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 22, pp. 1-9, 2016.
- [10] A. a. O. El-Ballouli, E. Alarousu, M. Bernardi, S. M. Aly, A. P. Lagrow, O. M. Bakr, Omar F Mohammed, "Quantum confinement-tunable ultrafast charge transfer at the PbS quantum dot and phenyl-C61-butyric acid methyl ester interface," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 136, pp. 6952-6959, 2014.
- [11] D. Liu and T. L. Kelly, "Perovskite solar cells with a planar heterojunction structure prepared using room-temperature solution processing techniques," *Nat Photon*, vol. 8, pp. 133-138, 02//print 2014.
- [12] M. Cheng, B. Xu, C. Chen, X. Yang, F. Zhang, Q. Tan, Yong Hua, Lars Kloo, and Licheng Sun, "Phenoxazine-Based Small Molecule Material for Efficient Perovskite Solar Cells and Bulk Heterojunction Organic Solar Cells," *Advanced Energy Materials*, vol. 5, 2015.
- [13] G. Yu, J. Gao, J. Hummelen, F. Wudl, and A. Heeger, "Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies via a The device structure consisted of a metal (Ca or Al) contact on the surface of a blend Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions," *Science*, vol. 270, 1995.
- [14] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 47)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 24, pp. 3-11, 2016.
- [15] C. Deibel, V. Dyakonov, and C. J. Brabec, "Organic bulk-heterojunction solar cells,"

- Journal of the American Chemical Society, vol. 130, pp. 16144-16145, 2008.
- [41] J. D. Servaites, S. Yeganeh, T. J. Marks, and M. A. Ratner, "Efficiency enhancement in organic photovoltaic cells: consequences of optimizing series resistance," *Advanced Functional Materials*, vol. 20, pp. 97-104, 2010.
- [42] R. Zohourian Aboutorabi, M. Joodaki, and K. Shahbazi, "In-depth analysis of solvent effects on bulk heterojunction solar cell performance," 2014, pp. 913718-913718-8.
- [43] R. Zohourian Aboutorabi and M. Joodaki, "A TRIPARTITE PHYSICS-BASED MODEL FOR ORGANIC SOLAR CELLS," 2014.
- [44] R. Zohourian Aboutorabi and M. Joodaki, "A Computational Study of Solvent Effects on Polymer Photovoltaics Considering the Field Dependent Series Resistance," 2014.
- [45] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*: John wiley & sons, 2006.
- [46] V. Coropceanu, J. Cornil, D. A. da Silva Filho, Y. Olivier, R. Silbey, and J.-L. Brédas, "Charge transport in organic semiconductors," *Chemical reviews*, vol. 107, pp. 926-952, 2007.
- [47] A. Guerrero, T. Ripolles-Sanchis, P. P. Boix, and G. Garcia-Belmonte, "Series resistance in organic bulk-heterojunction solar devices: Modulating carrier transport with fullerene electron traps," *Organic Electronics*, vol. 13, pp. 2326-2332, 11// 2012.
- [48] F. Schauer, "Space-charge-limited currents for organic solar cells optimisation," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 87, pp. 235-250, 5// 2005.
- [49] A. Luque, A. Martí, N. López, E. Antolin, E. Canovas, C. Stanley, C. Farmer, and P. Díaz, "Operation of the intermediate band solar cell under nonideal space charge region conditions and half filling of the intermediate band," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, p. 094503, 2006.
- [50] W. E. I. Sha, X. Li, and W. C. H. Choy, "Breaking the Space Charge Limit in Organic Solar Cells by a Novel Plasmonic-Electrical Concept," *Scientific Reports*, vol. 4, p. 6236, 08/29/online 2014.
- [51] W. Yoon, J. E. Boercker, M. P. Lumb, D. Placencia, E. E. Foos, and J. G. Tischler, "Enhanced open-circuit voltage of PbS nanocrystal quantum dot solar cells," *Scientific reports*, vol. 3, 2013.
- [52] L. Koster, E. Smits, V. Mihailetschi, and P. Blom, "Device model for the operation of polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells," *Physical Review B*, vol. 72, p. 085205, 2005.
- [53] E. Cantatore, *Applications of organic and printed electronics*: Springer, 2013.
- solar cells: An improved equivalent circuit model," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 122, pp. 88-93, 2014.
- [30] C.-H. Kim, M. J. Beliatis, K. K. Gandhi, L. J. Rozanski, Y. Bonnassieux, G. Horowitz, and S. R. P. Silva, "Equivalent Circuit Modeling for a High-Performance Large-Area Organic Photovoltaic Module," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, pp. 1100-1105, 2015.
- [31] A. Kumar, S. Sista, and Y. Yang, "Dipole induced anomalous S-shape IV curves in polymer solar cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 105, p. 094512, 2009.
- [32] P. Kumar and A. Gaur, "Model for the JV characteristics of degraded polymer solar cells," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, p. 094505, 2013.
- [33] J. W. Jin, S. Jung, Y. Bonnassieux, G. Horowitz, A. Stamateri, C. Kapnopoulos, A. Laskarakis, and S. Logothetidis, "Universal Compact Model for Organic Solar Cell," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, pp. 4053-4059, 2016.
- [34] G. Araujo, E. Sanchez, and M. Marti, "Determination of the two-exponential solar cell equation parameters from empirical data," *Solar cells*, vol. 5, pp. 199-204, 1982.
- [35] A. J. Naorem Santakrus Singh, Avinashi Kapoor, "An exact analytical method for calculating the parameters of a real solar cell using special trans function theory (STFT)," *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER*, vol. 3, 2013.
- [36] M. Prince, "Silicon solar energy converters," *Journal of Applied Physics*, vol. 26, pp. 534-540, 1955.
- [37] J. P. Charles, M. Abdelkrim, Y. H. Muoy, and P. Mialhe, "A practical method of analysis of the current-voltage characteristics of solar cells," *Solar Cells*, vol. 4, pp. 169-178, 1981/09/01 1981.
- [38] V. D. Mihailetschi, H. Xie, B. de Boer, L. A. Koster, and P. W. Blom, "Charge transport and photocurrent generation in poly (3-hexylthiophene): methanofullerene bulk-heterojunction solar cells," *Advanced Functional Materials*, vol. 16, pp. 699-708, 2006.
- [39] C. N. Hoth, P. Schilinsky, S. A. Choulis, S. Balasubramanian, and C. J. Brabec, "Solution-Processed Organic Photovoltaics," in *Applications of Organic and Printed Electronics: A Technology-Enabled Revolution*, E. Cantatore, Ed., ed Boston, MA: Springer US, 2013, pp. 27-56.
- [40] J. Hou, H.-Y. Chen, S. Zhang, G. Li, and Y. Yang, "Synthesis, characterization, and photovoltaic properties of a low band gap polymer based on silole-containing polythiophenes and 2, 1, 3-benzothiadiazole,"