

شبیه‌سازی سلول خورشیدی CIGS و بهینه‌سازی لایه ZnO:Al با نرم‌افزارهای COMSOL و T-CAD برای افزایش راندمان

سلیمان خاکساری قیری^۱، عباس رئیسی^۲، نفیسه شمس^۳، داود فدایی^۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۳/۳

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۸/۱۴

چکیده:

با توجه به درک جهانی و نیازمندی‌ها در زمینه استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر و پاک، انرژی خورشیدی در کانون توجه بسیاری از مراکز تحقیقاتی قرار گرفته است. امروزه کاهش قیمت ساخت در کنار راندمان، از اهداف مهم صنعت سلول‌های خورشیدی می‌باشد. یکی از راه‌های کاهش قیمت، بکارگیری فناوری فیلم نازک در این سلول‌ها می‌باشد که از اثر فتوولتایی استفاده می‌کنند. در بین این فیلم‌های نازک، Cu(In Ga)Se علاوه بر اینکه دارای قیمت پایینی است، بیشترین راندمان را نیز در بین فیلم‌های نازک دارا می‌باشد. در این مقاله، به شبیه‌سازی سلول خورشیدی نانو ساختار CIGS با استفاده از نرم‌افزارهای Sivaco-Tcad و Comsol پرداخته شده و در ادامه برای افزایش راندمان، ضخامت ZnO:Al بهینه سازی شده است. بیشترین راندمان با نرم‌افزار Comsol در بهینه‌سازی ضخامت، مقدار ۱۹,۱ و با نرم‌افزار T-CAD برابر با ۱۹,۷۰۲ در ضخامت ۰,۳ میکرومتر برای این لایه به دست آمد. در نهایت، با بهینه‌سازی پهنای این لایه در همین ضخامت بهینه شده، مقدار راندمان در ضخامت ۳ میلی‌متر تا ۱۹,۹ درصد افزایش یافت.

کلمات کلیدی:

نیروگاه‌های خورشیدی، تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی، منطق فازی، استان هرمزگان

S.Khaksari@yahoo.com
R.abbas@aut.ac.ir
Nafise_shams@gmail.com
Fadaid@aut.ac.ir

(۱) کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(۲) کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(۳) کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات اراک
(۴) استادیار مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مقدمه

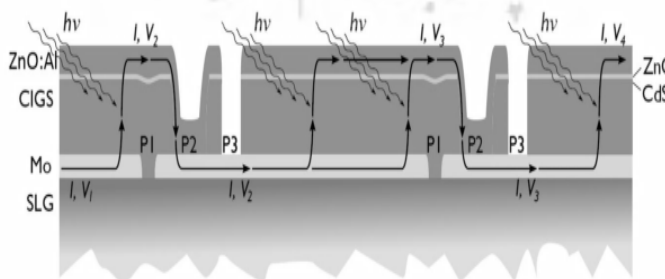
امروزه بشر در اثر پیشرفت‌های علمی در زمینه‌های گوناگون نیاز روزافزونی به انرژی پیدا کرده است. این امر بشر را بر آن داشته تا با روش‌های مختلف انرژی مورد نیاز خود را کسب کند. در عین حال، اساسی‌ترین مشکل در تولید انرژی به روش‌های سنتی (سوخته‌های فسیلی، گاز طبیعی و زغال سنگ) آلودگی‌های زیست محیطی آنها همچون گرم شدن کره زمین و اثرات گلخانه‌ای، کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش هزینه تولید آنها می‌باشد. بنابراین، روی آوردن بشر به منابع انرژی جدیدی که تا حدی پایان ناپذیر باشند و باعث آلودگی هوا نشوند، امری اجتناب ناپذیر است. در این بین، انرژی خورشید به عنوان یک منبع پاک، آزاد و تجدیدپذیر پایدار، به عنوان جایگزینی خوب برای سایر منابع انرژی مورد توجه قرار گرفته است. خورشید منبع عظیم انرژی است و می‌توان گفت منشأ تمام انرژی‌های دیگر است. انرژی تابشی خورشید که در هر روز به زمین می‌رسد، برای برآورده کردن انرژی مورد نیاز یک سال کره زمین کافی است. انرژی خورشیدی به طور مستقیم یا غیر مستقیم می‌تواند به دیگر اشکال انرژی همانند گرما و الکتریسیته تبدیل شود. برای تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته می‌توان از اثر فتوولتائیک با استفاده از سلول‌های خورشیدی بهره برد. فناوری سلول خورشیدی و کاربردهایش در طول چهار دهه اخیر بشدت گسترش یافته است. از جمله اهداف مهم صنعت سلول خورشیدی، افزایش راندمان و در عین حال، کاهش قیمت آنها می‌باشد. در این راستا، سلول‌های فیلم نازک به عنوان نسل دوم سلول‌های خورشیدی شناخته می‌شوند [۸]. در سلول‌های خورشیدی فیلم نازک از موادی استفاده می‌شود که به طور طبیعی قیمت پایینی دارند و همچنین روش‌های ساخت این گونه سلول‌ها به طور بالقوه هزینه کمی در بردارند، اما راندمان آنها نسبت به سلول‌های سیلیکونی کم است و نیاز به بهبود دارد. سلول خورشیدی $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ یا همان CIGS بر پایه سلول خورشیدی نیمه رسانای $CuInSe_2$ بوده و با اضافه شدن آلیاژ گالیوم به این نیمه رسانا به دست می‌آید [۱۱]. اضافه کردن گالیوم به سلول‌های خورشیدی بر پایه CIS باعث بهتر شدن راندمان دستگاه و ویژگی‌های الکتریکی می‌شود [۳، ۱۱]. سلول‌های CIGS علاوه بر اینکه دارای راندمان نسبتاً بیشتری نسبت به دیگر فناوری‌ها بوده، در تابش‌های بسیار زیاد نیز بسیار مقاوم‌تر هستند و این بدین معنی است که آنها انحراف خاصی را تحت شدت‌های زیاد نشان نمی‌دهند [۱۲]. عملکرد سلول‌های خورشیدی لایه نازک توسط اتلاف‌های الکتریکی و نوری که مستقل از هر کدام از ماژول‌های سلول خورشیدی بوده و به ساختار اتصالاتی این ماژول‌ها و ویژگی‌های انتقالی حاصل از لایه $ZnO:Al$ است، محدود می‌گردد. امروزه کاهش قیمت ساخت در کنار راندمان، از اهداف مهم صنعت سلول‌های خورشیدی می‌باشد. یکی از راه‌های کاهش قیمت، بکارگیری فناوری فیلم نازک در این سلول‌ها می‌باشد که از اثر فتوولتایی استفاده می‌کنند. در بین این فیلم‌های نازک، $Cu(InGa)Se$ علاوه بر اینکه دارای قیمت پایینی است، بیشترین راندمان را نیز در بین فیلم‌های نازک دارا می‌باشد. تحقیق و توسعه در مورد انرژی فتوولتایی عموماً در دو زمینه کاهش هزینه‌ها و افزایش بازده صورت می‌گیرد. سلول‌های خورشیدی فیلم نازک CIGS در بین دیگر انواع سلول‌های خورشیدی بازده بالاتری دارند. در این مقاله، به بررسی عملکرد

سلول خورشیدی نانو ساختار CIGS پرداخته شده است. با تغییر ضخامت لایه شفاف ساختار سلول (ZnO)، تأثیر این تغییر ضخامت را بر خواص الکتریکی و عملکرد کلی آن مورد ارزیابی قرار داده شده و با استفاده از ابزارهای شبیه سازی راندمان بهینه تعیین گردیده است.

شبیه سازی رایانه ای می تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل تاثیرات هر کدام از این پارامترها روی عملکرد هر کدام از ماژول های سلول خورشیدی عمل کند [۱۰،۵]. در این کار برای بررسی تاثیرات این پارامترها به شبیه سازی این سلول خورشیدی پرداخته شده و در ادامه برای افزایش راندمان در این سلول خورشیدی، ضخامت لایه ZnO:Al درون این سلول با استفاده از دو نرم افزار رایانه ای بهینه شده است. در مرحله بعد، ضخامت و پهنای لایه ZnO:Al به طور همزمان بهینه سازی شد و حداکثر راندمان در این سلول خورشیدی ۱۹،۹ درصد به دست آمد. در چندین مقاله [9,12] برای بهبود در بازده سلول خورشیدی CIGS تلاش هایی انجام شده است. در مقالات دیگر برای افزایش راندمان پارامترهای مختلف به صورت جداگانه شبیه سازی و اثر این پارامترها بر روی افزایش راندمان محاسبه می گردد، اما در این مقاله ضخامت و پهنای لایه ZnO:Al به صورت همزمان با استفاده از دو نرم افزار مختلف بهینه سازی شده و نتایج نشان دهنده یک ضخامت و پهنای بهینه برای این لایه می باشد و نتایج راندمان بدست آمده نشان دهنده بهبود این عامل مهم در سلول خورشیدی CIGS نسبت به دیگر مقالات گردید.

ساختار سلول های خورشیدی فیلم نازک CIGS

در فناوری CIGS سلول ها می توانند در یک اتصال سری در طول فرایند ساخت به هم متصل شوند که یکی دیگر از ویژگی های خوب است که فناوری CIGS را از سلول های دیگر بر پایه ی بافرها متمایز می کند. شکل زیر ساختار اتصال داخلی شامل سه قسمت را نشان می دهد: اول (P1)، لایه مولیبدنیوم می باشد، لایه دوم (P2) لایه های CIGS، CdS و ZnO (TCO) می باشد که روی قسمت بالایی مولیبدنیوم قرار می گیرد و لایه سوم (P3) زیر مولیبدنیوم قرار می گیرد.



شکل (۱) ساختار اتصال داخلی ماژول CIGS [9]

اتصال جلویی ZnO:Al: این اتصال که همان لایه اول می‌باشد، آلومینیم ناخالص شده با زینک اکسید (ZnO:Al) و لایه زینک اکسید (n_ZnO) می‌باشد که به عنوان TCO^۱ به کار می‌رود. این لایه در سلول خورشیدی باید دارای دو ویژگی مهم باشد: شفافیت کافی مورد نیاز برای رسیدن نور کافی به لایه جذب CIGS را فراهم کند و رسانش کافی مورد نیاز برای انتقال جریان فوتونی تولید شده به مدار خارجی بدون اتلاف مقاومتی بیش از اندازه را فراهم نماید و همچنین از نظر قیمت نیز ارزان باشد.

لایه بافر CdS: این لایه بافر به طور معمول یک باند گپ برابر با ۲ تا ۳,۴ الکترون ولت را داراست که یک پیش‌نیاز برای ایجاد یک ابزار ناهمگونی می‌باشد [۶]. نقش دیگر این لایه حفاظت از ویژگی‌های الکتریکی لایه جذب در برابر برهمکنش‌های شیمیایی و آسیب‌های شیمیایی در فرایندهای گام‌های بعدی می‌باشد [۱۱]. حذف این لایه بافر باعث کم شدن راندمان CIGS می‌گردد. [۹]

لایه جذب CIGS: زوج الکترون-حفره‌های زیادی که به وسیله نور فرودی تولید می‌شوند به وسیله لایه جذب CIGS جذب می‌شوند. از آنجایی که CIGS ضریب جذب بالایی دارد، یک لایه با ضخامت تقریبی ۱ تا ۲,۵ میکرومتر برای جذب بیشترین تابش از خورشید کافی است. [۱۱].

اتصال پشتی مولیبدنیوم: پلاتینیوم، طلا، نقره، مس، و مولیبدنیوم چندین فلز مناسب برای تماس الکتریکی پشتی می‌باشند. در این بین، مولیبدنیوم نسبت به فلزات دیگر ترجیح داده می‌شود که دلیل آن پایداری در فرایندهای دمایی و مقاومت پایین در اتصال با CIGS می‌باشد. [۱۱]

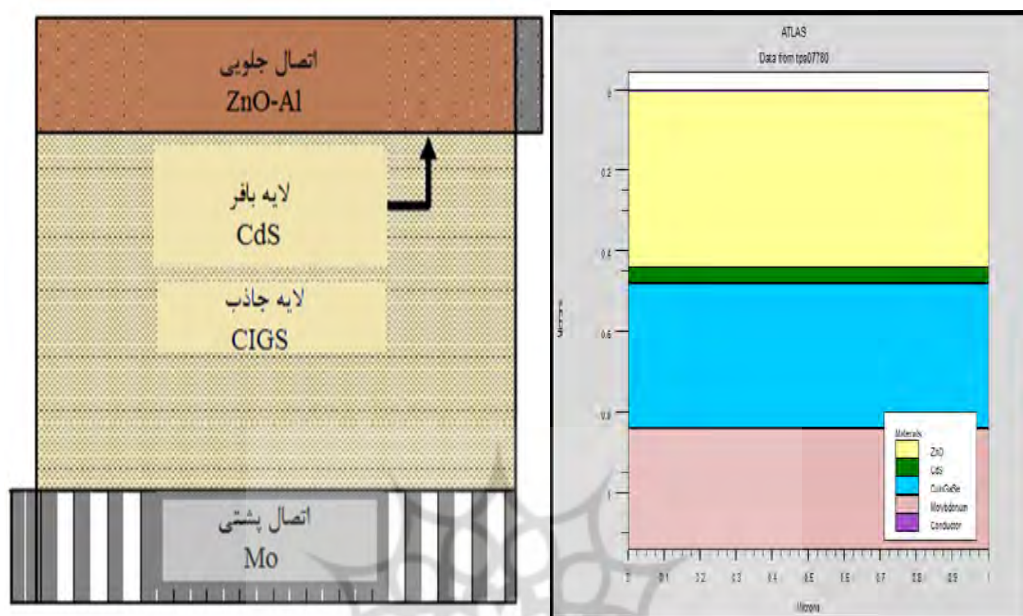
شبیه سازی سلول خورشیدی CIGS

همانطور که گفته شد، سلول خورشیدی CIGS از چهار لایه تشکیل شده است که در جدول (۱) مشخصات این لایه‌ها بیان شده است. در شکل (۲) هندسه شبیه‌سازی شده برای این سلول خورشیدی در نرم‌افزار کامسول و T-CAD نشان داده شده است. پارامترهای فیزیکی برای شبیه‌سازی هندسه در هر دو نرم‌افزار کاملاً یکسان می‌باشد.

جدول (۱) مشخصات لایه‌های تشکیل دهنده سلول خورشیدی

ناحیه	نوع ماده	رسانا/ نیمه رسانا	چگالی ناخالصی
اول	ZnO	رسانا	-
دوم	CdS	نیمه رسانا نوع p	1e18
سوم	CIGS	نیمه رسانا نوع n	2e16
چهارم	Molybdenum	رسانا	-

1) Transport Conductive Oxide



شکل ۲) هندسه استفاده شده در شبیه‌سازی سلول خورشیدی CIGS - هندسه سمت راست مربوط به نرم‌افزار T-CAD و هندسه سمت چپ مربوط به نرم‌افزار کامسول می‌باشد.

در استفاده از نرم‌افزار کامسول برای به دست آوردن منحنی مشخصه جریان چگالی از معادلات زیر استفاده می‌کنیم:

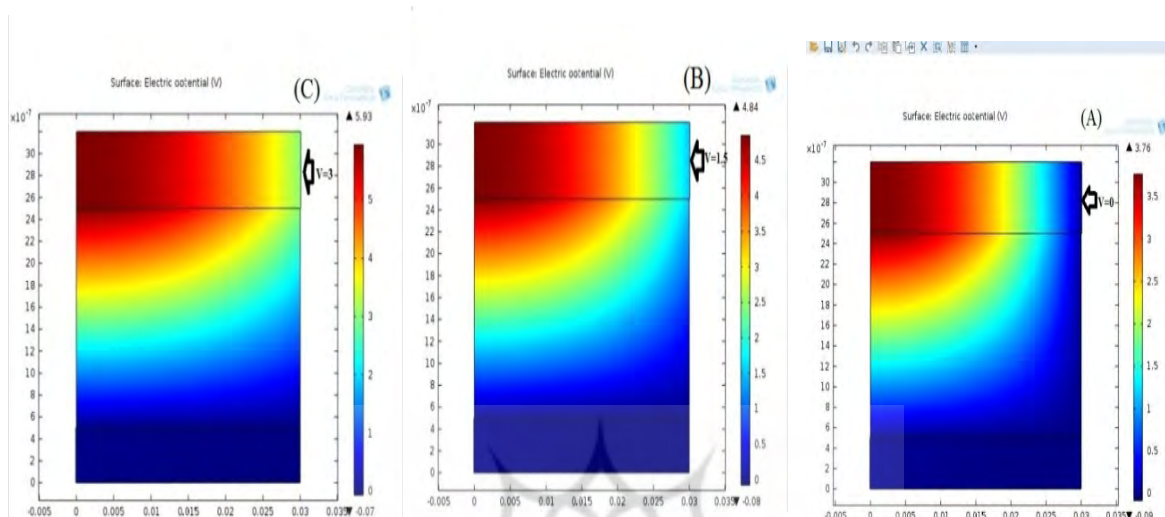
$$J_L = T_{\text{ZnO:Al}} J_{L,\text{in}} \quad (1) \quad \text{معادله جریان نوری}$$

$$J_0 = J_{00} e^{-E_g / A k T} \quad (2) \quad \text{معادله جریان اشباع دیود}$$

$$T_{\text{ZnO:Al}} = 1 - \left(\frac{0.37.7}{R_{\text{ZnO:Al}}} \right)^{0.8226} \quad (3)$$

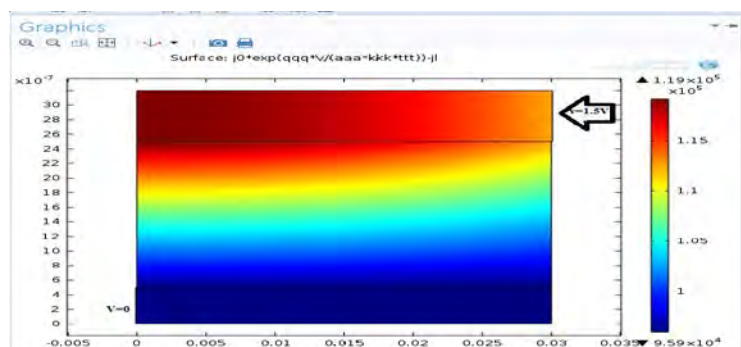
$$J_i = J_0 e^{V_i / A k T} - J_L \quad (4)$$

در شکل (۳) نتایج حاصل از توزیع پتانسیل در لایه‌های مختلف از سلول خورشیدی CIGS بر اثر اعمال یک پتانسیل خارجی نشان داده شده است.



شکل ۳) توزیع پتانسیل در CIGS در لایه‌های مختلف با اعمال پتانسیل (A): 0، (B): 1,5 و (C): 3 ولت

شکل‌های فوق شدت پتانسیل الکتریکی درون لایه‌های مختلف از یک سلول خورشیدی CIGS را در مقابل ضخامت (mm) بر اثر اعمال یک پتانسیل خارجی نشان داده شده است. در این ژئومتری ها، شرایط مرزی اولیه بر روی شکل نشان داده شده است که در همه آنها، لایه زیرین که مربوط به مولیبدنیوم می‌باشد و در پتانسیل صفر قرار داده شده است و پتانسیل لایه بالا که مربوط به لایه ZnO می‌باشد، تغییر می‌کند. با استفاده از این شکل‌ها می‌توان مقدار پتانسیل در لایه‌های مختلف و همچنین در تمام نقاط درون هندسه را به دست آورد. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود لایه پایینی مربوط به مولیبدنیوم می‌باشد که کاملاً رسانا می‌باشد و به همین دلیل، پتانسیل درون آن تقریباً صفر می‌باشد و آبی رنگ می‌باشد. باند بالایی مربوط ZnO می‌باشد که دارای یک رسانایی محدود می‌باشد و بنابراین، افت پتانسیل کوچکی در آن وجود دارد. بیشترین تفاوت در اختلاف پتانسیل در لایه وسط وجود دارد که مربوط به ضخامت CIGS می‌باشد. این لایه به عنوان لایه جاذب به کار می‌رود و اکثر نور خورشیدی که به سلول خورشیدی می‌رسد، در این لایه جذب و از طریق اتصالات داخلی بین لایه‌های مختلف به لایه‌های مجاور رفته و در نهایت، گردآوری می‌شود. دلیل اینکه در گوشه سمت چپ در لایه ZnO همواره بیشترین مقدار اختلاف پتانسیل وجود دارد و بارنگ کاملاً قرمز نشان داده شده، جریان نوری حاصل از تابش اولیه می‌باشد که مقدار آن 350 A/m^2 می‌باشد. شکل (۴) نیز مولفه x توزیع چگالی جریان را در لایه‌های مختلف از سلول خورشیدی نشان می‌دهد.

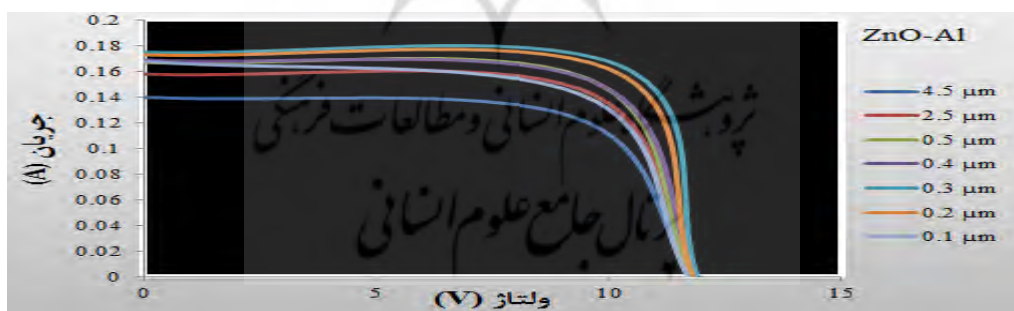


شکل (۴) مولفه x توزیع چگالی جریان

بحث و نتیجه‌گیری

ZnO:Al ضخامت

شکل (۵) منحنی ولتاژ در برابر جریان برای ضخامت‌های مختلف از لایه‌ی ZnO:Al را نشان می‌دهد. نتایج گرافیکی با استفاده از نتایج پتانسیل الکتریکی و چگالی جریان در نقاط مختلف درون هندسه سلول خورشیدی CIGS برای ضخامت‌های مختلف از این لایه رسم شده است. مقادیر عددی حاصل از این منحنی‌ها نشان‌دهنده افزایش راندمان بر اثر کاهش ضخامت می‌باشد که مقادیر آن در جدول (۲) آورده شده است.



شکل (۵) منحنی ولتاژ در برابر جریان برای ضخامت‌های مختلف لایه‌ی ZnO:Al با نرم‌افزار کامسول

در جدول (۲) V_{mp} و I_{mp} حداکثر جریان و ولتاژ در نقطه عملکرد در شرایط بهینه می‌باشد و V_{oc} حداکثر ولتاژ در نقطه‌ای که در آن جریان برابر صفر می‌باشد و I_{sc} نیز حداکثر جریان در نقطه‌ای است که ولتاژ صفر است. در ادامه، با استفاده از معادله (۵) مقدار راندمان در این ضخامت‌ها را به دست می‌آوریم. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین راندمان برای سلول خورشیدی در نرم‌افزار کامسول در ضخامت ۰٫۳ میکرومتر از این لایه به دست می‌آید که مقدار آن ۱۹٫۱ درصد می‌باشد.

$$= \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (5)$$

که در این رابطه، P_{mp} حداکثر توان خروجی در شرایط عملکرد بهینه و P_{in} توان نور فرودی است که در شرایط استاندارد آزمایشگاهی (STC) برابر با 1000 W/m^2 می‌باشد و برای به دست آوردن FF از معادله (۶) استفاده می‌شود.

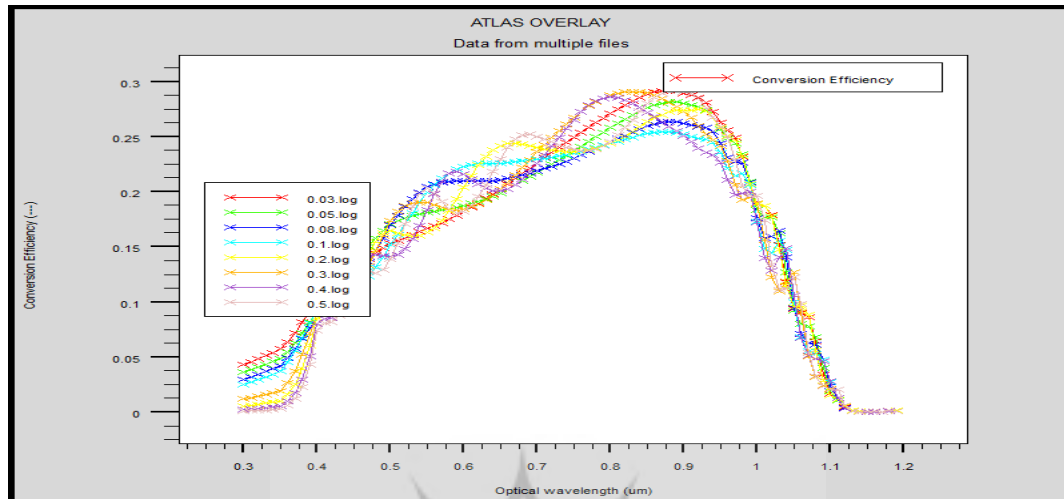
$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (6)$$

جدول ۲) مشخصه های الکتریکی حاصل از شبیه سازی سلول خورشیدی با تغییر ضخامت لایه ZnO:Al

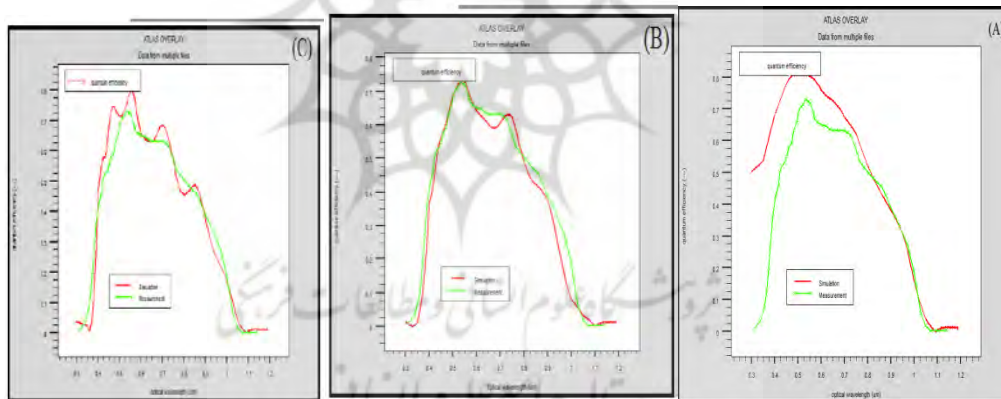
با نرم افزار کامسول

ضخامت (μm)	I_{sc} (A)	V_{oc}	I_{mp}	V_{mp}	FF (%)	η (%)
۴,۵	۰,۱۴	۱۱,۲	۰,۱۲۸	۹,۲	۷۵,۲	۱۱,۷
۲,۵	۰,۱۵۸	۱۱,۳	۰,۱۴۶	۹,۴	۷۷,۵	۱۳,۷
۰,۵	۰,۱۶۹	۱۱,۲	۰,۱۶۱	۹,۹	۸۴,۱۶	۱۶
۰,۴	۰,۱۶۹	۱۱,۱	۰,۱۵۳	۹,۶	۷۷,۵	۱۴,۵
۰,۳	۰,۱۷۸	۱۱,۳	۰,۱۷۶	۱۰,۹	۹۵,۳	۱۹,۱
۰,۲	۰,۱۷۵	۱۱,۲	۰,۱۷۲	۱۰,۶	۹۳	۱۸,۲
۰,۱	۰,۱۶۸	۱۱,۱	۰,۱۴۲	۹,۴	۷۰,۳	۱۲,۹

در ادامه، با استفاده از نرم افزار T-CAD به بهینه سازی نتایج حاصل از شبیه سازی و به دست آوردن ضخامت بهینه برای رسیدن به بیشترین راندمان می‌پردازیم. در شکل (۶) منحنی راندمان سلول خورشیدی شبیه سازی شده در این نرم افزار برای ضخامت های مختلف از ZnO:Al نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در این نرم افزار نیز بیشترین راندمان در ضخامت ۰,۳ میکرومتر از این لایه به دست می‌آید و مقدار این راندمان برابر با ۱۹,۷ درصد می‌باشد. مقادیر راندمان در ضخامت های مختلف از این لایه در جدول (۴) بیان شده است.



شکل ۶) منحنی راندمان سلول خورشیدی CIGS در ضخامت های مختلف لایه ZnO بر حسب طول موج



شکل ۷) راندمان سلول خورشیدی CIGS در ضخامت های (A) ۰,۳ میکرومتر، (B) برابر ۰,۴ میکرومتر و (C) ۰,۶ میکرومتر از لایه ZnO:Al

همانطور که شکل (۷) نشان می دهد، با کاهش ضخامت راندمان سلول بهبود یافته است. زیرا با کاهش ضخامت لایه شفاف نور کمتری منعکس شده، فوتون های بیشتری به لایه جاذب GIGS می رسد. با فرض اینکه شدت نور خورشید X برابر متمرکز شود، در این صورت، توان ورودی بر سطح پیل و I_{sc} هر دو X برابر می شود و V_{oc} نیز افزایش یافته است به این ترتیب توان خروجی بیش از X برابر، بالا می رود [۸]. در نتیجه، انرژی فوتولتائی افزایش می یابد. بنابراین، کاهش ضخامت لایه شفاف در بهبود راندمان سلول موثر خواهد بود.

جدول (۳) نتایج حاصل از این بهینه سازی را برای ضخامت‌های مختلف از لایه‌ی ZnO:Al بیان می‌کند.

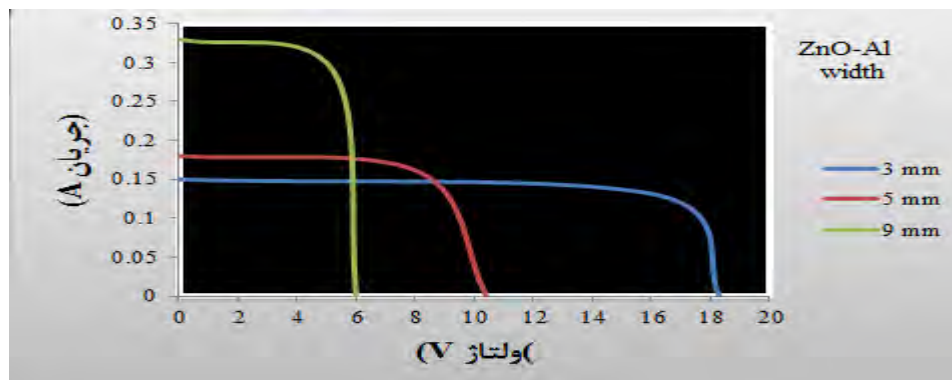
جدول (۳) مشخصه‌های الکتریکی حاصل از شبیه سازی سلول خورشیدی با تغییر ضخامت لایه ZnO:Al

ضخامت (μm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^{-2})	FF (%)	η (%)
۰/۵	۰/۵۱۷	۲۹/۸۱۰	۸۲/۷۶۰	۱۶/۶۳۹
۰/۴	۰/۵۰۹	۱۹/۷۳۷	۸۲/۱۱۶	۱۰/۷۴۲
۰/۳	۰/۵۲۲	۳۵/۹۳۵	۸۲/۶۲۷	۱۹/۷۰۲
۰/۲	۰/۵۲۲	۳۴/۰۴۱	۸۲/۶۲۵	۱۹/۶۲۰
۰/۱	۰/۵۰۸	۱۹/۶۸۸	۸۲/۱۰۸	۱۰/۷۱۴
۰/۰۸	۰/۵۰۸	۱۹/۶۸۰	۸۲/۱۱۲	۱۰/۷۰۹
۰/۰۵	۰/۵۱۰	۲۱/۳۵۳	۸۲/۳۵۴	۱۱/۶۸۸

علت تغییر راندمان سلول خورشیدی با تغییر ضخامت لایه ZnO:Al، تغییر مقدار فوتون‌های عبوری از این لایه و جذب آنها توسط لایه جاذب CIGS می‌باشد. همچنین در ضخامت‌های کم، فوتون‌ها فاصله کمتری را در طول پیوند طی نموده و با انرژی بیشتری به لایه بعدی برخورد می‌کنند و بدین ترتیب، زوج الکترون-حفره بیشتری تولید می‌گردد. اما زمانی که ضخامت سلول خورشیدی به اندازه کافی زیاد نباشد، بخشی از فوتون‌هایی که از طریق مواد سلول خورشیدی منتقل می‌شوند، دچار اتلاف می‌گردند.

در نهایت، از ضخامت بهینه برای لایه ZnO-Al که در مرحله قبل به دست آمد، در شبیه‌سازی استفاده کرده و به بهینه‌سازی ضخامت این لایه می‌پردازیم. با این کار ضخامت و پهنای این لایه را به طور همزمان بهینه‌سازی می‌کنیم.

نتایج حاصل از بهینه سازی در ضخامت سلول ZnO-Al نیز در منحنی (۸) و جدول (۴) آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد ضخامت بهینه برای این سلول در ۳ میلی‌متر است و حداکثر راندمان بدست آمده در این حال ۱۹,۹ درصد می‌باشد.



شکل ۸) منحنی‌های جریان در مقابل ولتاژ برای سه ضخامت سلول مختلف ZnO:Al در ضخامت بهینه ۰,۳ میکرومتر

جدول ۴) مقایسه مشخصه‌های الکتریکی حاصل از شبیه‌سازی سلول خورشیدی

با تغییر ضخامت لایه ZnO در ضخامت ۰,۳ میکرومتر

ضخامت (mm)	I_{sc} (A)	V_{oc}	I_{mp}	V_{mp}	FF (%)	η (%)
۳	۰,۱۵	۱۸,۱	۰,۱۲	۱۶,۶	۷۳,۳	۱۹,۹
۵	۰,۱۸	۱۰,۴	۰,۱۷	۸,۴	۷۶,۲	۱۴,۲
۹	۰,۳۳	۵,۵	۰,۳۰	۴,۳	۷۱,۱	۱۲,۹

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، یک تبادل بین جریان و ولتاژ در زمانی که ضخامت سلول تغییر می‌کند، وجود دارد. همانگونه که ضخامت سلول افزایش می‌یابد، سلول‌های کمتری در این اتصال سری در ماژول قرار می‌گیرند و این باعث می‌شود هر چه پهنای سلول زیاد شود، ولتاژ کاهش یابد و در نتیجه، جریان نیز زیادتر شود. پس وابسته به اینکه نیاز ما چیست، اگر جریان زیادتر مطلوب و مورد نیاز باشد، پس طراحی ماژول CIGS باید به گونه‌ای باشد که سطح سلول‌ها بزرگ‌تر باشد. بعد از به دست آوردن راندمان نیز مشخص است که بهترین راندمان برای ضخامت سلول ۳ میلی‌متر به دست می‌آید.

نتایج

در این مقاله سلول خورشیدی لایه‌نازک CIGS با استفاده از نرم‌افزار کامسول و T-CAD شبیه‌سازی شده و در ادامه ضخامت و پهنای لایه ZnO:Al برای به دست آوردن بیشترین مقدار راندمان بهینه شد.

در انجام این کار ابتدا با به دست آوردن راندمان در ضخامت‌های مختلف از لایه ZnO:Al مشخص شد که با کاهش ضخامت این لایه در هر دو نرم‌افزار، مقدار راندمان افزایش یافته و حداکثر راندمان در یک ضخامت بهینه یعنی ۰,۳

میکرومتر به دست می‌آید و با کاهش ضخامت به کمتر از این مقدار بهینه، مقدار راندمان دوباره کاهش می‌یابد. حداکثر راندمان برای ضخامت ۰,۳ میکرومتر با استفاده نرم‌افزار کامسول ۱۹,۱ درصد و برای نرم‌افزار T-CAD مقدار ۱۹,۷ درصد می‌باشد. در ادامه، با در نظر گرفتن ضخامت ۰,۳ میکرومتر برای این لایه در نرم‌افزار کامسول به بهینه‌سازی ضخامت این لایه پرداخته شد و نتایج نشان داد که در پهنای ۳ میلی‌متر و ضخامت ۰,۳ میکرومتر حداکثر مقدار راندمان برابر با ۱۹,۹ درصد به دست آمد. در این کار، با بهینه‌سازی همزمان ضخامت و پهنای لایه ZnO:Al به نتایج مطلوبتری برای راندمان نسبت به کارهای قبلی دست پیدا کرده و مقدار راندمان این سلول خورشیدی تا ۱۹,۷ درصد افزایش یافت و ضخامت و پهنای بهینه برای دست‌یابی به این راندمان در هر دو نرم‌افزار دارای نتایج یکسانی می‌باشد.

منابع

- [1] A. Shah, P. Torres, R. Tscharnner, N. Wyrsh, H. Keppner (1999). "Photovoltaic technology: The case for thin-film solar cells". Science, vol 285, no 5428, pp 692-698.
- [2] Amin, N. et al. (2012) "Numerical Modeling of Ultra Thin CIGS Solar Cells". International Conference on Material for advanced Technologies, Symposium, . 15: p. 291-298.
- [3] A. Niemegeers, M. Burgelman, R. Herberholz, U. Rau, D. Hariskos, and H.-W. Schock, (1998) Prog. Photovolt. Res. Appl. 6, pp. 407-421.
- [4] A.O. Pudov, J.R. Sites, T. Nakada, (2002) Performance and loss analyses of highefficiency chemical bath deposition (CBD)-ZnS/Cu(In_{1-x}Gax)Se₂ thin-film solar cells, Jpn. J. Appl. Phys. 41 672-674.
- [5] IRENA, (2012), Renewable Energy Technologies" Cost Analysis Series,.
- [6] Johansson, J., (2008), Modelling and Optimization of CIGS Solar cells Modules", in Department of Architect, Lund University: Lund, Scania, Sweden.
- [7] K. Ramanathan, J. Keane, R. Noufi, (2005) Properties of high-efficiency CIGS thin-film, solar cells, in: 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Lake Buena Vista Florida, January 3-7.
- [8] M. Burgelman, A. Niemegeers, (1998), Solar Energy Mat. Solar Cells 51 pp. 129-143.
- [9] Malm, U. and M. Edoff, (2009) "Simulating Material Inhomogeneities and Defects in CIGS Thin film Solar Cells". Progress in Photovoltaics. 17(5) : p. 306-314.
- [10] Nakada, T. (2012) Invited Paper: "CIGS-based Thin Film Solar Cells and Modules: Unique Material Properties". Electronic Material Letters, 8(2) : p. 179-185.
- [11] Singh. U.P. and S.P. Patra, (2012) Review Article: "Progress in Polycrystalline Thin-Film Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells". International Journal of Photoenergy.
- [12] S.K. Peter Capper. Arthur Willoughby, (2006), "Thin Film solar cells fabrication , characterization and applications", Wiltshire, England: John Wiley and Sons.