

## مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1400.7.2.12.5

درصد همانندی: ۱۲%

## استفاده از ترکیبات Perovskite/CIGS برای طراحی سلول خورشیدی دوپیوندی با بازدهی بالا به منظور کاربرد در تجهیزات دریایی

مریم هدایتی<sup>۱</sup> و سعید علیائی<sup>۲\*</sup>

ma.hedayati@sru.ac.ir

<sup>۱</sup> دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

s\_olyaee@sru.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶

## چکیده

در این مقاله طراحی یک سلول خورشیدی دوپیوندی با استفاده از پروسکایت CIGS به منظور استفاده از آن به عنوان یک منبع انرژی پاک در تجهیزات دریایی بررسی می شود. در طراحی این ساختار، ابتدا سلول خورشیدی بالایی با لایه جاذب پروسکایت و شکاف باند  $1.9\text{eV}$ ، سلول خورشیدی زیرین با لایه جاذب CIGS و شکاف باند  $1.4\text{eV}$  شبیه سازی شده اند. با توجه به اینکه شکاف باند پروسکایت و CIGS هر دو قابل تنظیم هستند، این دو ماده به عنوان لایه جاذب در سلول خورشیدی دوپیوندی می توانند عملکرد مناسبی داشته باشند. برای اتصال دو سلول بالا و پایین از معماری چهار ترمیناله استفاده شده است. در این ساختار از پیوند همگون پروسکایت نوع  $n$  و  $p$  استفاده شده که وظیفه انتقال و جداسازی حامل ها به عهده میدان الکتریکی داخلی است؛ به دلیل کوچک تر بودن ناحیه تخلیه، نسبت به ساختار  $n-i-p$  و  $p-i-n$ ، باز ترکیب حامل ها افزایش و تلفات نوری کاهش می یابد که به افزایش بازدهی منجر می شود. بازدهی سلول خورشیدی دوپیوندی طراحی شده  $30/71\%$  در صد به دست آمده است. با توجه به بازدهی این سلول خورشیدی و پایداری مناسب در شرایط محیطی مختلف، از این ساختار می توان به عنوان یک منبع انرژی پاک برای تجهیزات دریایی و ناوبری استفاده نمود.

**واژه های کلیدی:** اتصال چهار ترمیناله؛ بازدهی؛ پیوند همگون؛ تجهیزات دریایی؛ سلول خورشیدی چند پیوندی.

## ۱. مقدمه

با وجود کاهش منابع فسیلی و گرم شدن زمین در اثر تولید و افزایش گازهای گلخانه‌ای، استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر جایگاه ویژه‌ای در تمام دنیا پیدا کرده است. یکی از موضوعات چالش‌برانگیز قرن بیست و یکم کنترل گرمایش جهانی و محدود کردن افزایش دمای کره زمین در حد دو درجه سانتی‌گراد است. تا سال ۲۰۵۰ میانگین تقاضای انرژی پیش‌بینی شده به ۲۸ تراوات و تا سال ۲۱۰۰ به ۴۶ تراوات خواهد رسید [۱]. استفاده از انرژی خورشیدی یکی از راهکارهای پیشنهادی است و فناوری آن در سال‌های اخیر بسیار توسعه یافته است.

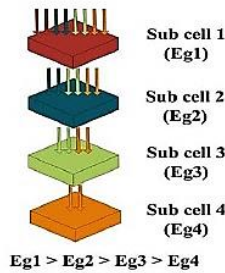
از جمله حوزه‌هایی که به دریافت انرژی از منابع تجدیدپذیر نیازمند است، می‌توان به تجهیزات دریایی و ناوربری [۲ و ۳] اشاره کرد. این تجهیزات و امکانات شامل تجهیزات مدرن رادیویی به منظور ارتباطات دریایی، شناورهای یدک‌کش و راهنما برای عملیات پهلودهی و جداسازی شناورها، علائم کمک ناوربری و تجهیزات مدرن هیدروگرافی است. در سیستم توزیع برق کشتی، مصرف‌کننده‌ها به دو دسته (۱) مصرف‌کننده‌های اضطراری شامل دستگاه‌های ناوربری، تجهیزات ترک کشتی در هنگام خطر و سکان و (۲) مصرف‌کننده‌های غیر اضطراری تقسیم می‌شوند.

در واقع، سیستم برق اضطراری لازم است در مواقع بحرانی قطع کلی برق اصلی، به‌عنوان یک منبع انرژی پایدار در دسترس باشد و دست کم به مدت ۳ ساعت کارایی مفید داشته باشد. استفاده از نور خورشید برای تولید انرژی، از جمله در تجهیزات دریایی و ناوربری، بدون شک فرایندی پاک است و کمترین تأثیر را بر محیط دارد. با توجه به اینکه انرژی خورشید به میزان گسترده در بسیاری از نقاط جهان در دسترس قرار دارد، تنها منبعی که توانایی جایگزینی سوخت‌های فسیلی را دارد، سلول‌های خورشیدی است. به همین دلیل در دنیا تلاش‌های زیادی برای افزایش استفاده از سلول‌های خورشیدی، بهبود ساخت و افزایش بازدهی این سلول‌ها در سال‌های گذشته انجام شده است و اکنون نیز در حال انجام است.

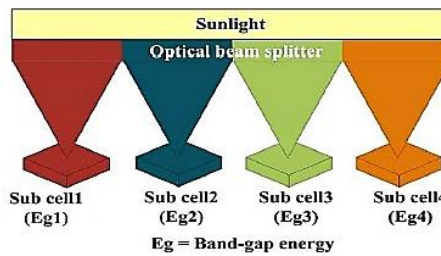
فناوری سلول‌های خورشیدی چندپیوندی در اوایل سال ۱۹۷۸ آغاز شد [۴]. در میان سلول‌های خورشیدی که در چند دهه اخیر مورد بررسی و مطالعه فراوان قرار گرفته‌اند، سلول‌های خورشیدی چندپیوندی مبتنی بر ترکیبات مختلف به‌عنوان سلول‌های با بازدهی بالا جایگاه خاصی دارند. این سلول‌ها که از چند لایه نیم‌رسانا با شکاف باندهای متفاوت همراه با تطبیق ثابت شبکه‌ای تشکیل شده‌اند، قادر به جذب وسیعی از طیف خورشیدی بوده، بنابراین تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریسته به‌وسیله این سلول‌های چندپیوندی می‌تواند در گستره بزرگی انجام شود [۵]؛ زیرا در لایه اول ساختاری قرار دارد که بیشترین انرژی شکاف باند را نسبت به زیر لایه‌ها دارد، بنابراین می‌تواند فوتون‌های نوری انرژی بالای دارای فرکانس بالا را جذب کند. فوتون‌های با انرژی کمتر به ترتیب جذب لایه‌های بعدی که انرژی شکاف باند کمتری دارند، خواهند شد. این ساختار موجب افزایش بازده سلول خورشیدی در مقایسه با سلول‌های تک‌پیوندی می‌شود [۶].

در سلول‌های خورشیدی چندپیوندی چندین ماده با شکاف باند متفاوت روی هم رشد داده می‌شوند. هر لایه نیم‌رسانا که به‌عنوان یک لایه مجزا در ساخت کل سلول قرار گرفته، توانایی جذب محدوده‌ای از طول‌موج‌های نورتابشی طیف خورشیدی و تبدیل آن به الکتریسته را دارد. در نتیجه زیرلایه‌های نیم‌رسانا می‌توانند به این شکل روی هم قرار گیرند که در لایه اول آن نیم‌رسانا در مقایسه با سایر نیم‌رساناهای مورد استفاده در کل ساختار شکاف انرژی بزرگ‌تری دارد، قرار می‌گیرد تا بتواند قسمتی از طیف که انرژی بیشتری دارد، یعنی طول‌موج کوتاه را جذب کند [۷]. امواج با طول‌موج بالاتر که انرژی کمتری دارند از لایه اول ساختار عبور کرده و به لایه‌های زیرین که از نیم‌رساناهایی با شکاف انرژی کمتر تشکیل شده‌اند برخورد می‌کند تا در لایه‌های زیرین جذب شوند [۸]. مهم‌ترین نکته در طراحی سلول‌های خورشیدی پشت سرهم، انتخاب درست شکاف باندها جهت بهره‌برداری بهینه از طیف خورشیدی است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، سلول

[۹]؛ (۱) سلول‌های خورشیدی چندپیوندی عمودی<sup>۱</sup> و (۲) سلول‌های خورشیدی چندپیوندی افقی<sup>۲</sup>.



(ب)



(الف)

شکل ۱. سلول‌های خورشیدی چندپیوندی، (الف) سلول افقی و (ب) سلول عمودی [۱۰]

(ETL) در بالا و پایین آن‌ها قرار گرفته، استفاده شده است. لایه جاذب سلول پایینی CIGS است. با توجه به اینکه در معماری چهارترمیناله نیاز به تطبیق جریان و پیوند تونلی نیست، در این شبیه‌سازی دو سلول بالا و پایین به صورت چهارترمیناله به هم متصل شده‌اند.

## ۲. معرفی پارامترهای طراحی

نکته مهم در مورد سلول‌های خورشیدی این است که چگونه به طول‌موج‌های مختلف نور فرودی واکنش نشان می‌دهند و اکسیژن<sup>۳</sup> تولید می‌کنند. جفت الکترون-حفره‌های تولیدشده (EHP) حامل‌های بار آزاد نیستند، اما با نیروی جذب کولمبی به یکدیگر متصل شده‌اند. این جفت‌های متصل شده "اکسیژن" نامیده می‌شوند. به‌طورمثال پاسخ طیفی سلول‌های خورشیدی CIGS به نور خورشید بین ۴۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر است. همچنین پاسخ طیفی سلول دوپیوندی برابر با مجموع دو سلول تک‌پیوندی تشکیل‌دهنده آن است. بنابراین سلول دوپیوندی توانایی جذب طیفی وسیعی از نور خورشید را دارد. پاسخ طیفی اهمیت زیادی در تعیین بازدهی سلول دارد.

پاسخ طیفی سلول را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$SR(\lambda) = \quad (۱)$$

$1/qF(\lambda)[1 - R(\lambda)](J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda))$  که در اینجا SR پاسخ طیفی، q بار الکترون، F(λ) آهنگ فوتون‌های رسیده به واحد سطح نیم‌رسانا با طول‌موج λ،  $J_p(\lambda)$

خورشیدی چندپیوندی بر اساس روش‌های شکاف طیف نوری و زاویه متوسط محل اتصال به دو گروه تقسیم می‌شود

پروسکایت به‌عنوان لایه جاذب در سلول‌های خورشیدی برای نخستین بار در سال ۲۰۰۹ توسط میاساکا گزارش شد [۱۱]. تحرک بالای حامل‌ها، فرایند ساخت آسان و جذب نور بیشتر در ناحیه مرئی باعث شده تا پروسکایت به‌عنوان لایه فعال نوری در سلول خورشیدی مورد توجه باشد. در سال ۲۰۱۹ سلول خورشیدی دو پیوندی perovskite/Si و perovskite/CIGS با معماری ۴ ترمیناله طراحی و ساخته شده است که بازدهی آن‌ها به ترتیب ۲۵٪ و ۲۵/۷٪ گزارش شده است [۱۲].

در گزارشی مقدار بازدهی اتصال p-n و p-i-n در سلول خورشیدی تک‌پیوندی پروسکایت مقایسه شده که در اتصال p-n دو درصد افزایش بازدهی نسبت به اتصال p-i-n داشته است [۱۳]. با افزودن مقدار کمی گالیوم به لایه CIS، شکاف باند آن را می‌توان از مقدار طبیعی ۱eV به ۱/۷eV افزایش داد که از نظر تئوری بازدهی سلول را بهبود می‌بخشد [۱۴].

ساختار بیشتر سلول‌های خورشیدی مبتنی بر پروسکایت p-i-n یا n-i-p است؛ اما اخیراً مقایسه‌ای بین معماری‌های پروسکایت همگون و ناهمگون انجام شده که در معماری‌های همگون pn، بازده سلول خورشیدی ۲۳ درصد است و در مقایسه با معماری‌های ناهمگون افزایش چشم‌گیری داشته است [۱۵].

در این مقاله، ابتدا یک سلول خورشیدی پروسکایت به صورت اتصال دیودی p-n در نرم‌افزار سیلواکو-اتلس شبیه‌سازی شده است. برای این امر از دو لایه پروسکایت نوع n و p که دو لایه انتقال‌دهنده حفره (HTL) و انتقال‌دهنده الکترون

Metal Grid Au			
ETL	n-type	0.1 $\mu\text{m}$	$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Absorber Layer Perovskite	n-type	1.5 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
Absorber Layer Perovskite	p-type	0.5 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
HTL	p-type	0.04 $\mu\text{m}$	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

(الف)

Front Contact ZnO:Al		0.02 $\mu\text{m}$	
Buffer Layer CdS	n-type	0.1 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Absorber Layer CIGS	p-type	3.5 $\mu\text{m}$	$8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$
Back Contact Mo		0.5 $\mu\text{m}$	

(ب)

Metal Grid Au			
ETL	n-type	0.1 $\mu\text{m}$	$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Absorber Layer Perovskite	n-type	1.5 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
Absorber Layer Perovskite	p-type	0.5 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
HTL	p-type	0.04 $\mu\text{m}$	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Front Contact ZnO:Al		0.02 $\mu\text{m}$	
Buffer Layer CdS	n-type	0.1 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Absorber Layer CIGS	p-type	3.5 $\mu\text{m}$	$8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$
Back Contact Mo		0.5 $\mu\text{m}$	

(ج)

شکل ۲. شماتیک (الف) سلول خورشیدی تک پیوندی بالا، (ب) سلول خورشیدی تک پیوندی پایین، (ج) سلول خورشیدی دو پیوندی perovskite/ CIGS با معماری چهار ترمیناله

جریان تولید شده از قسمت p و  $J_n(\lambda)$  جریان تولید شده از قسمت n و  $J_{dr}(\lambda)$  جریان تولید شده از ناحیه تهی است.

شبهه سازی در شرایط استاندارد، دمای ۳۰۰ درجه کلوین و تابش ۱/۵AM انجام شده است. شکل ۲ شماتیک سلول خورشیدی شبهه سازی شده را نشان می دهد.

در این شبهه سازی، از معادله های دیفرانسیل جزئی (PDEs) برای مدل سازی سلول با استفاده از حل عددی نیوتن استفاده شده است. عملکرد سلول خورشیدی را می توان با حل هم زمان سه معادله اصلی پواسون، پیوستگی و انتقال حامل ها ارزیابی کرد [۱۶].

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho_s}{\epsilon_s} \quad (2)$$

در این رابطه E میدان الکتریکی،  $\rho_s$  چگالی فضای بار و  $\epsilon_s$  ضریب گذردهی نیم رساناست. معادله های پیوستگی الکترون و حفره در شرایط پایدار نیز از روابط زیر به دست می آیند:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + (G_n - R_n) \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + (G_p - R_p) \quad (4)$$

در این روابط، پارامترهای n و p به ترتیب چگالی الکترون و حفره، بار الکترون،  $J_n$  و  $J_p$  به ترتیب چگالی جریان الکترون و حفره،  $G_n$  و  $G_p$  نرخ تولید الکترون و حفره،  $R_n$  و  $R_p$  آهنگ باز ترکیب الکترون و حفره را مشخص می کند.

پارامترهای مورد نیاز به منظور شبهه سازی سلول خورشیدی دو پیوندی Perovskite/CIGS در جدول ۱ آمده است [۱۷].

### ۳. ساختار سلول خورشیدی

برای ارائه ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی، ابتدا سلول بالایی و پایینی به صورت مستقل شبهه سازی و بررسی شده اند. سپس سلول خورشیدی دو پیوندی طبق شکل ۲ با ضخامت لایه ها و مقادیر چگالی ناخالصی، شبهه سازی شده و پارامترهای سلول به دست آمده است.

با توجه به اینکه قبلاً تأثیر شبکه های فلزی مختلف روی سلول خورشیدی دو پیوندی Perovskite/CIGS بررسی شده است [۱۸] و از آنجا که مهم ترین ویژگی الکترو د بالایی تابع کار آن است، در این ساختار به دلیل نزدیک بودن تابع کار طلا به پروسکایت، طلا به عنوان اتصال فلزی استفاده شده است.

جدول ۱. پارامترهای نیم‌رسانا مورد استفاده برای شبیه‌سازی.

پارامترها	نماد	واحد	Perovskite	HTL	ETL	CdS	CIGS
شکاف باند	$E_g$	eV	۱/۹	۲/۳۱	۳/۵	۲/۴	۱/۴
وابستگی الکترون	$X_c$	eV	۳/۹	۴/۰۸	۳/۹	۴	۴/۶
نفوذپذیری نسبی	$\epsilon_r$	$F.cm^{-1}$	۶/۵	۹	۶/۵	۱۰	۱۳/۶
تحرك الکترون	$\mu_n$	$cm^2/V.s$	۱/۶	۲۵	۱/۶	۱۰۰	۱۰۰
تحرك حفره	$\mu_p$	$cm^2/V.s$	۰/۲	۱۰۰	۰/۲	۲۵	۲۵
چگالی مؤثر حالت‌های باند هدایت	$N_c$	$cm^{-3}$	$1.8e2/2$	$1.8e2/2$	$1.8e2/2$	$1.8e2/2$	$1.8e2/2$
چگالی مؤثر حالت‌های باند ظرفیت	$N_v$	$cm^{-3}$	$1.9e1/8$	$1.9e1/8$	$1.9e1/8$	$1.9e1/8$	$1.9e1/8$

ناخالصی  $2 \times 10^{18} cm^{-3}$  نوع p، لایه پروسکایت با ضخامت ۱/۵ میکرومتر و چگالی ناخالصی  $2 \times 10^{17} cm^{-3}$  نوع n، در نهایت لایه ETL با ضخامت ۰/۱ میکرومتر و چگالی ناخالصی  $5 \times 10^{18} cm^{-3}$  نوع n را نشان می‌دهد. همچنین برای مقایسه دو ساختار pn و pin پروسکایت، ساختار pin پروسکایت نیز با لایه ذاتی به ضخامت ۱ میکرومتر و چگالی ناخالصی  $10^{14} cm^{-3}$  شبیه‌سازی شده است.

با توجه به شکل ۳ خمیدگی‌های نوار معرف میدان در ساختار هستند. در ساختار pin ناحیه جاذب وسیع‌تر است در نتیجه الکترون برای خروج از ناحیه تخلیه مسیر خیلی زیادی نسبت به ساختار pn باید طی کند که احتمال باز ترکیب بیشتر است. شکل ۴ مشخصه جریان-ولتاژ سلول خورشیدی تک پیوندی پروسکایت را در حالت اتصال pn و pin پروسکایت با هم مقایسه کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ساختار pn پروسکایت، ولتاژ مدار باز بیشتر از ساختار pin شده است. به کمک این نمودار می‌توان پارامترهای اصلی سلول را محاسبه کرد.

تعداد فوتون‌های جذب‌شده در واحد سطح از سلول خورشیدی در واحد زمان برحسب طول‌موج برای سلول خورشیدی تک پیوندی پروسکایت برای ساختار pn و pin در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، بیشترین بازده جذب سلول در لایه پروسکایت اتفاق افتاده است.

#### ۴. نتایج تحلیل سلول بالایی پروسکایت

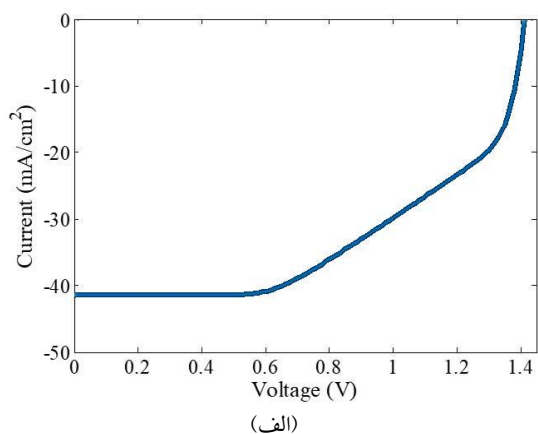
در این قسمت ابتدا نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سلول خورشیدی تک پیوندی پروسکایت که سلول بالایی ساختار دو پیوندی را تشکیل می‌دهد، بررسی شده است. هم‌جنس بودن اتصال p-n پروسکایت باعث خم شدن باند انرژی می‌شود، پتانسیل داخلی را افزایش می‌دهد و سبب افزایش ولتاژ مدار باز افزاره می‌شود که برای عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایت مفید است. در این ساختار وظیفه انتقال و جداسازی حامل‌ها به عهده میدان الکتریکی داخلی است.

در پروسکایت‌ها با ساختار استاندارد p-i-n، انتقال حامل‌ها در لایه پروسکایت جهت مشخصی ندارد و ممکن است باعث باز ترکیب ناخواسته حامل‌ها شود. از آنجا که استخراج الکترون‌ها و حفره‌های ناشی از نور، بیشتر در لایه‌های ETL و HTL انجام می‌شود، از این رو، ساختار همگون پروسکایت طوری طراحی شده است که یک میدان الکتریکی داخلی اضافی در لایه پروسکایت ایجاد کند که در آن الکترون‌ها و حفره‌ها در جهت مخالف به ترتیب به سمت ETL و HTL با هدف کاهش باز ترکیب حامل‌ها حرکت کنند. سلول‌های خورشیدی پروسکایت همگون حتی در حضور رطوبت و اکسیژن که به عنوان عوامل حیاتی در تخریب پروسکایت شناخته شده‌اند، نسبتاً پایدار هستند.

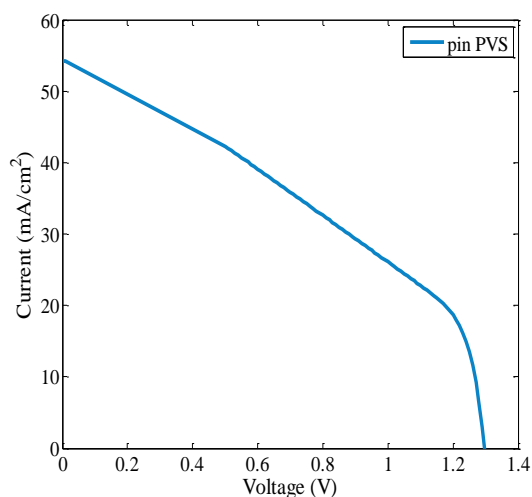
شکل ۳ ساختار باند سلول خورشیدی با لایه‌های HTL با ضخامت ۰/۰۴ میکرومتر و چگالی ناخالصی  $3 \times 10^{18} cm^{-3}$  نوع p، لایه پروسکایت با ضخامت ۰/۵ میکرومتر و چگالی

### ۵. نتایج تحلیل سلول پایینی (CIGS)

سلول خورشیدی CIGS به صورت اتصال دیودی p-n شبیه سازی شده است. برای این امر از لایه CIGS نوع p به عنوان لایه جاذب و CdS نوع n به عنوان لایه بافر که ZnO:Al لایه اتصال جلویی و اتصال پشتی از جنس مولیبدنیوم در پایین آن است استفاده شده است. لایه CIGS که نقش نیم رسانای نوع p را بازی می کند، لایه اصلی سلول پایینی است. ساختار باند سلول خورشیدی پایینی با لایه های CdS نوع n و CIGS نوع p، در شکل ۶ مشاهده می شود.

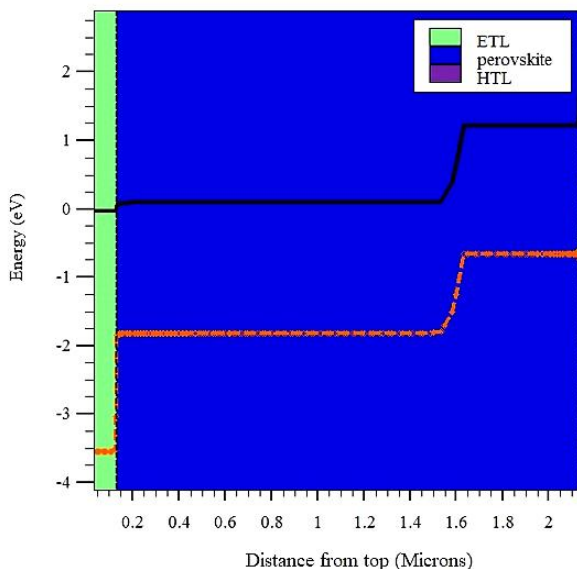


(الف)

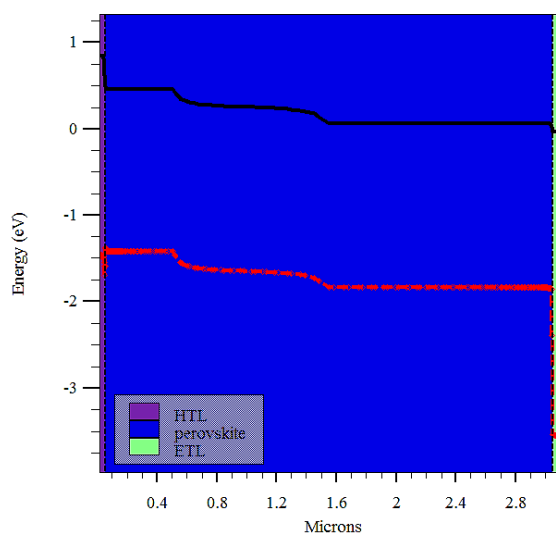


(ب)

شکل ۴. منحنی مشخصه جریان بر حسب ولتاژ برای سلول تک پیوندی پروسکایت (الف) ساختار pn و (ب) ساختار pin.



(الف)

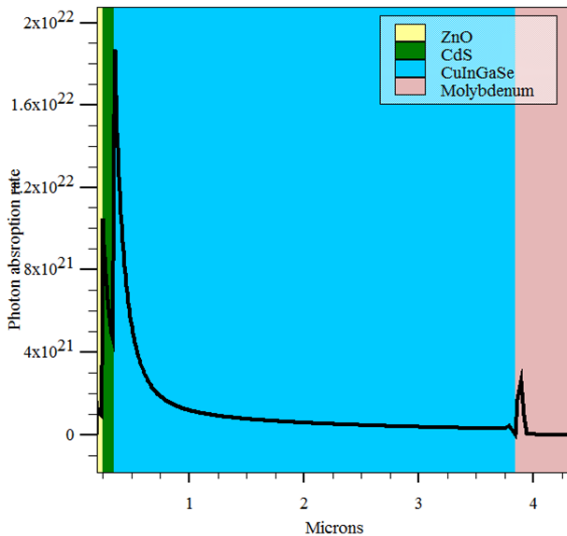


(ب)

شکل ۳. نمودار باند انرژی سلول خورشیدی پروسکایت تک پیوندی بالا (الف) ساختار pn پروسکایت و (ب) ساختار pin پروسکایت

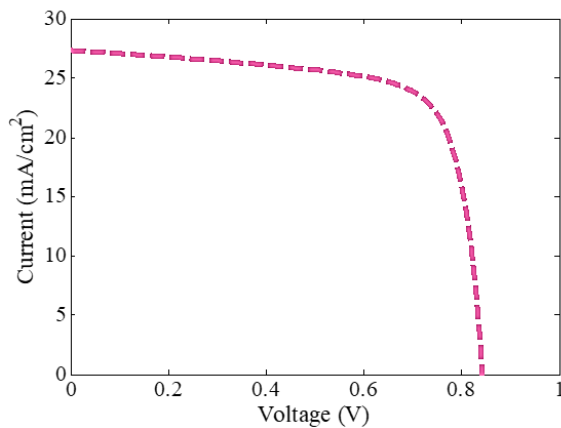
عمق میدان در ساختار pn حدود ۰/۸ میکرون و در pin حدود ۰/۵ میکرون است، اگر حامل ها در این ناحیه جذب شوند توسط میدان الکتریکی از هم جدا شده و باز ترکیب نمی شوند، در نتیجه هر چه این ناحیه بیشتر باشد، میزان حامل هایی که تولید می شوند و از هم جدا می شوند بیشتر است و جریان نوری نیز بیشتر است؛ که با توجه به توضیحات داده شده در ساختار pn جذب بیشتری به دست آمده است.

خورشیدی تک پیوندی CIGS را نشان می‌دهد. با توجه به شکل بیشترین میزان جذب با توجه به ضخامت آن در لایه جاذب (CIGS) رخ داده است. بالاترین پیک  $2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  که مربوط به لایه جاذب CIGS است.



شکل ۷. منحنی نرخ جذب فوتون برای سلول پایینی (CIGS)

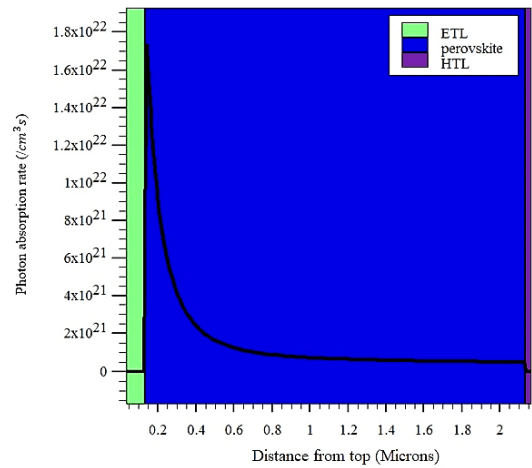
در شکل ۸ نمودار ولتاژ-جریان این سلول مشاهده می‌شود که علاوه بر افزایش جریان اتصال کوتاه تا مقدار  $27 \text{ mA/cm}^2$ ، ولتاژ مدار باز سلول نیز افزایش یافته است، به طوری که مقدار آن به  $0.84 \text{ V}$  ولت می‌رسد.



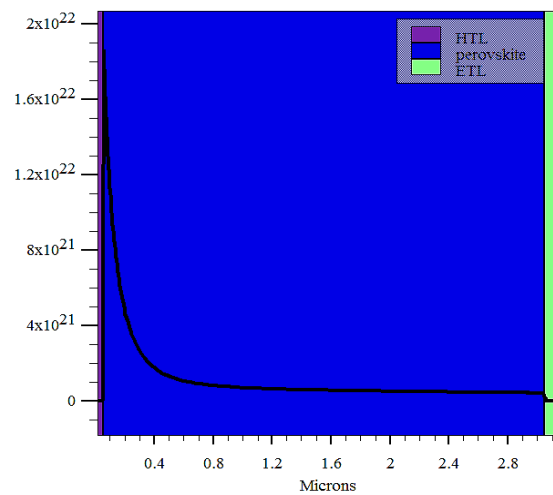
شکل ۸. منحنی مشخصه جریان-ولتاژ برای سلول خورشیدی

### ۶. شبیه‌سازی سلول دوپیوندی Perovskite/CIGS

با توجه به سلول‌های بالا و پایین که در دو قسمت قبلی بررسی شد، به شبیه‌سازی و بررسی کامل سلول خورشیدی دوپیوندی Perovskite/CIGS، پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه

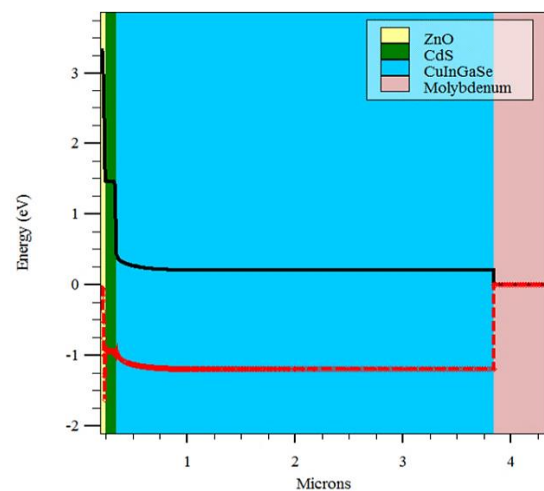


(الف)



(ب)

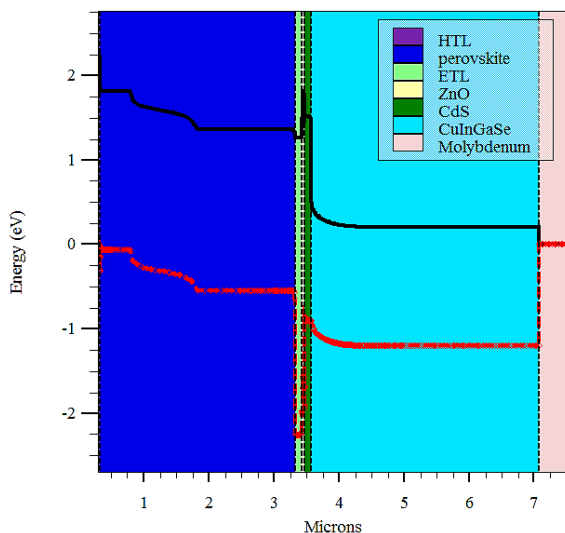
شکل ۵. منحنی نرخ جذب فوتون در سلول خورشیدی تک پیوندی بالایی (الف) ساختار pn پروسکایت (ب) ساختار pin



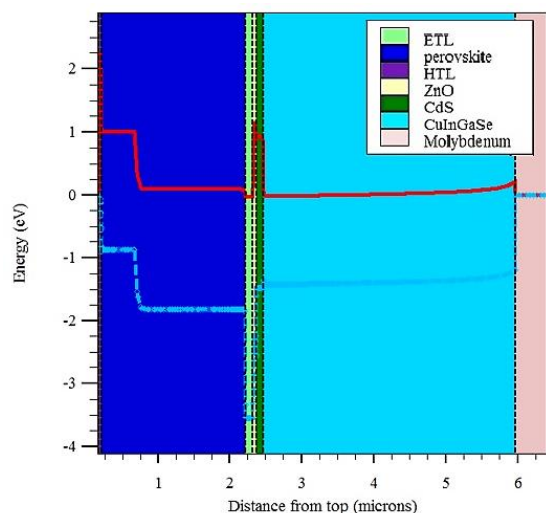
شکل ۶. نمودار باند انرژی سلول خورشیدی پایینی (CIGS)

شکل ۷ تعداد فوتون‌های جذب شده در واحد سطح از سلول خورشیدی در واحد زمان برحسب طول موج برای سلول

نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، سلول بالایی به دلیل لایه جاذب پروسکایت با شکاف باند بالاتر نسبت به سلول پایینی (CIGS) ولتاژ و چگالی جریان بالاتری دارد. همچنین در ساختار pn پروسکایت، مقدار ولتاژ مدار باز سلول دوپیوندی نسبت به ساختار pin بیشتر است. علاوه بر این با مقایسه نمودار جریان-ولتاژ برای هر کدام از سلول‌ها، در حالت دوپیوندی بیشترین مقدار ولتاژ را نسبت به دو حالت تک‌پیوندی خواهیم داشت.



(الف)



(ب)

شکل ۹. نمودار باند انرژی سلول خورشیدی دوپیوندی، (الف) ساختار pn پروسکایت و (ب) ساختار pin پروسکایت

پارامترهای فتوولتاییک به دست آمده از شبیه‌سازی سلول خورشیدی دوپیوندی Perovskite/CIGS در جدول ۲

پیش‌از این تأثیر شبکه‌های فلزی مختلف بر سلول خورشیدی دوپیوندی CGS/CIGS بررسی شده است [۱۹]، در این قسمت لایه جاذب سلول بالایی ماده پروسکایت و با توجه به تابع کار پروسکایت اتصال بالایی طلاست. در واقع در اتصال همگون پروسکایت می‌توان گفت در لایه ذاتی، یک pn ایجاد شده است.

شکل ۹ ساختار باند سلول خورشیدی را در حالت دوپیوندی برای هر دو ساختار pn و pin پروسکایت نشان داده است. نمودار باند انرژی برای بررسی عملکرد کلی حامل‌ها در سلول خورشیدی است. با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت‌های قبلی مقدار ولتاژ مدار باز سلول بالایی بیشتر است (۱/۱۴۷) که نمودار باند انرژی نیز تأیید می‌کند. مشاهده می‌شود که در فصل مشترک‌ها لبه نوار رسانش و ظرفیت یک خمیدگی به سمت بالا پیدا می‌کنند. این امر باعث تسهیل در حرکت حامل‌ها و جدایی بهتر حامل‌ها در فصل مشترک و در نتیجه باعث افزایش بازدهی می‌شود. با توجه به شدت میدان در مرز دو سلول خورشیدی و ضخامت لایه‌های واسط استفاده شده، امکان تونل‌زنی حامل فراهم شده است.

در گام بعدی، نرخ جذب فوتون در سلول خورشیدی دوپیوندی بررسی شده است. شکل ۱۰ منحنی نرخ جذب فوتون در سلول خورشیدی دوپیوندی با ساختار پروسکایت pn و pin را نشان می‌دهد. در لایه پروسکایت و CIGS که محدوده آن توسط راهنمای شکل مشخص شده است بیشترین میزان جذب را نسبت به سایر لایه‌ها نمایش داده است، همچنین در فصل مشترک‌ها نیز افزایش جذب مشاهده می‌شود. نقاط اوج موجود به دلیل تغییر (افزایش) ضریب جذب لایه‌های مختلف سلول است. در طول هر لایه نیز جذب، طبق رابطه بیر-لامبرت<sup>۵</sup> به صورت

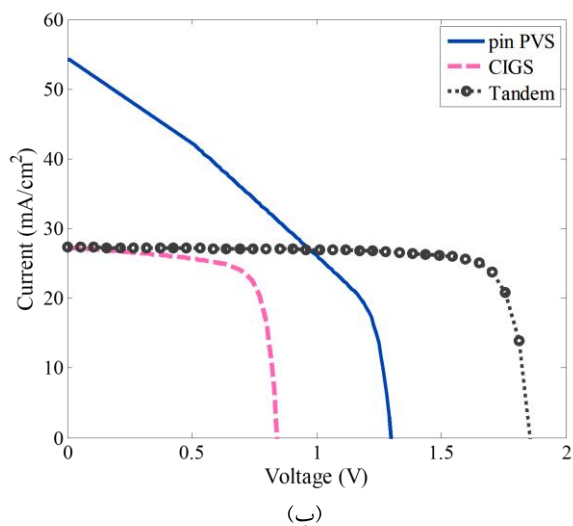
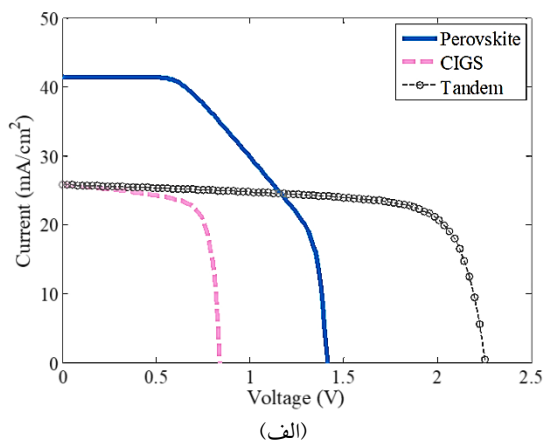
$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right) = abc \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $I_0$  شدت نور اولیه،  $I$  شدت نور عبوری،  $a$  ضریب جذب،  $b$  طول و  $c$  غلظت نمونه است.

مقایسه منحنی مشخصه جریان-ولتاژ برای سلول خورشیدی بالایی، پایینی و دوپیوندی برای ساختار pn و pin در شکل ۱۱



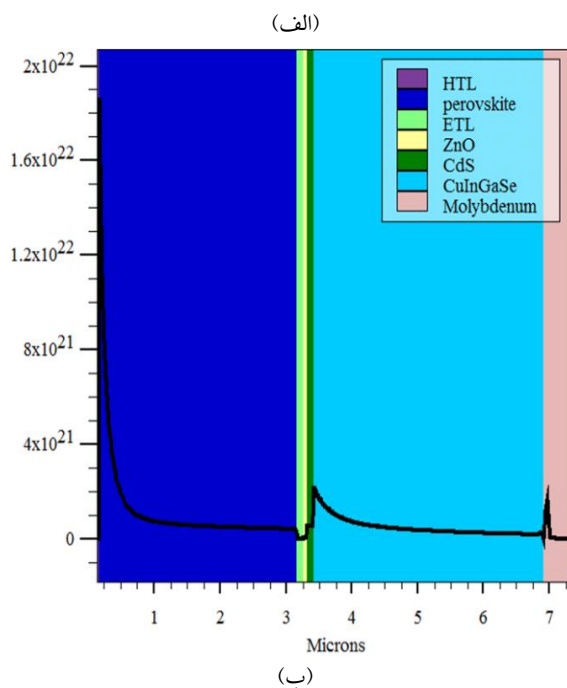
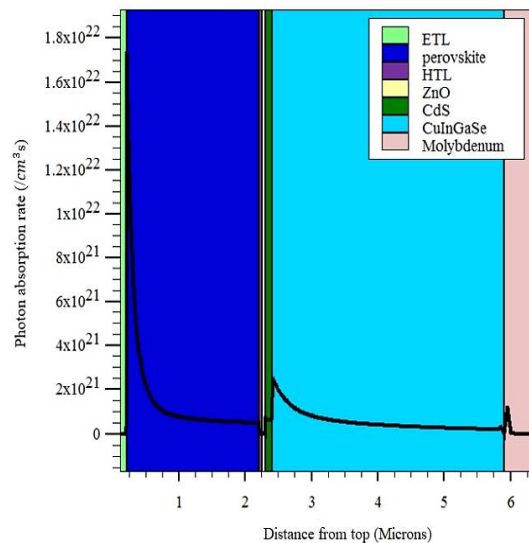
آورده شده و با سلول‌های تک‌پیوندی پروسکایت و CIGS نیز مقایسه شده است. همچنین کارهای مشابه انجام شده نیز در جدول مقایسه آورده شده است.



شکل ۱۱. مقایسه نمودار جریان-ولتاژ سلول خورشیدی بالایی، پایینی و دوپیوندی، (الف) ساختار pn پروسکایت و (ب) ساختار pin پروسکایت

با توجه به جدول ۲، در حالت دوپیوندی ولتاژ مدار باز افزایش یافته است که باعث افزایش بازدهی نیز شده که در مقایسه با کار مشابه انجام شده که از پیوند ناهمگون پروسکایت استفاده شده بود، حدود ۳ درصد افزایش داشته است [۲۰].

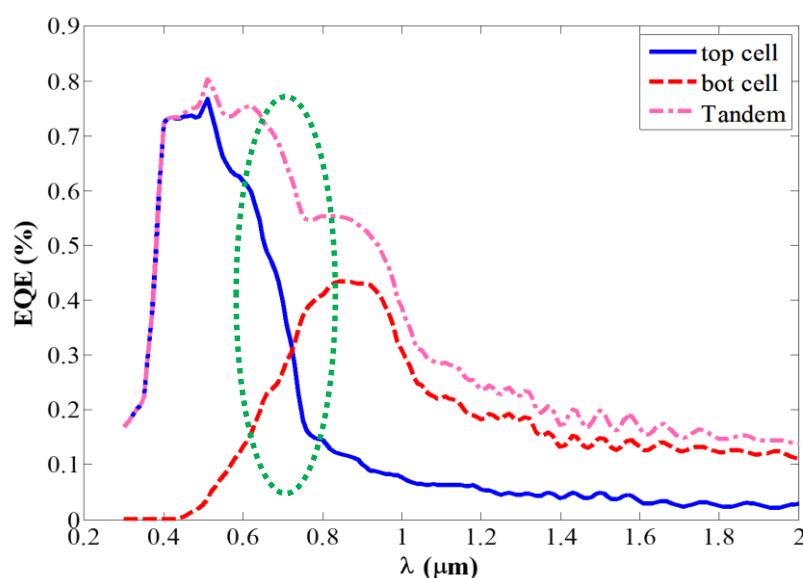
همچنین در سلول دوپیوندی با پروسکایت همگون مقدار بازدهی حدود یک درصد نسبت به سلول دوپیوندی با پروسکایت ناهمگون بیشتر شده است. بازده کوانتومی خارجی، تعداد الکترون‌های جمع‌آوری شده بر واحد فوتون فرودی را تعیین می‌کند.



شکل ۱۰. منحنی نرخ جذب فوتون در سلول خورشیدی دوپیوندی perovskite/CIGS. (الف) ساختار pn پروسکایت و (ب) ساختار pin پروسکایت

جدول ۲. مقایسه پارامترهای فتولتائیک سلول‌های خورشیدی تک پیوندی و دو پیوندی

بازدهی (%)	(%) ضریب پرشدگی	(V) ولتاژ مدار باز	جریان اتصال کوتاه (mA/cm <sup>2</sup> )	
۲۱/۶۵	۵۱/۰۶	۱/۴۱	۴۱/۴۵	سلول تک پیوند پروسکایت همگون
۱۱/۴۶	۷۲/۹۳	۰/۸۴	۲۵/۸۰	سلول تک پیوند پایینی (CIGS)
۳۰/۷۱	۷۳/۰۲	۲/۲۵	۲۵/۸۰	سلول دو پیوندی perovskite/CIGS همگون
۲۹/۸۳	۷۱/۲۵	۲/۱۳	۲۵/۸۰	سلول دو پیوندی perovskite/CIGS ناهمگون
۲۰/۸۰	۷۷/۵۰	۱/۰۸	۲۳/۸۶	اتصال همگون پروسکایت [۴۰]
۲۷/۵	۷۲/۸۵	۱/۶۹	۱۵/۷۹	Perovskite/CIGS با لایه ذاتی [۹۳]



شکل ۱۲. بازده کوانتومی خارجی برای سلول خورشیدی بالایی و پایینی برحسب طول موج نور ورودی

## ۷. نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا سلول خورشیدی تک پیوندی پروسکایت با بازده ۲۱/۶۵ درصد و سلول خورشیدی تک پیوندی CIGS با بازده ۱۱/۴۶ درصد شبیه سازی شد. پس از شبیه سازی سلول دو پیوندی و با استفاده از اتصال همگون پروسکایت که در واقع داخل خود لایه ذاتی یک pn ایجاد شده است، تلفات نوری کاهش و باز ترکیب حامل ها افزایش یافته است که به بهبود بازدهی به مقدار ۳۰/۷۱٪ منجر شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که ساختار طراحی شده برای سلول خورشیدی در این مقاله می تواند برای یک منبع انرژی پاک تجهیزات دریایی و ناوربری به کار برده شود. در تحقیقات آتی، ساخت نمونه

شکل ۱۲ بازدهی کوانتومی خارجی را برحسب طول موج نور ورودی برای مقادیر مختلف سلول های بالا و پایین نشان می دهد. نتایج به دست آمده در شکل ۱۲ نشان می دهد که منطقه طول موج های کوتاه زیر ۰/۶ میکرومتر بیشتر توسط سلول بالایی جذب می شود، در حالی که جذب طول موج های بین ۰/۶ تا ۱/۱ میکرومتر بر عهده سلول پایینی است. با توجه به ضریب شکست پروسکایت و CIGS، نوسانات در محدوده طول موج بیشتر از ۱۰۰۰ نانومتر رخ می دهد. در ناحیه اشاره شده با رنگ سبز، بازده کوانتومی خارجی، مجموع بازده کوانتومی سلول بالا و پایین است.

- [11] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the american chemical society*. 2009 May 6;131(17):6050-1.
- [12] Gharibzadeh S, Hossain IM, Fassel P, Nejad BA, Abzieher T, Schultes M, et al. 2D/3D heterostructure for semitransparent perovskite solar cells with engineered bandgap enables efficiencies exceeding 25% in four-terminal tandems with silicon and CIGS. *Advanced Functional Materials*. 2020 May;30(19):1909919.
- [13] He Q, Gu H, Zhang D, Fang G, Tian H. Theoretical analysis of effects of doping MAPbI<sub>3</sub> into pn homojunction on several types of perovskite solar cells. *Optical Materials*. 2021 Nov 1;121:111491.
- [14] Chandrasekaran V. Effect of heat treatments and reduced absorber layer thickness on Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> thin film solar cells. MSc Thesis, University of South Florida, 2005.
- [15] Sengar BS, Garg V, Kumar A, Dwivedi P. Numerical simulation: Design of high-efficiency planar pn homojunction perovskite solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021 Mar 24;68(5):2360-4.
- [16] Hedayati M. Design and Simulation Based Chalcogenide Tandem Solar Cell to Increase Efficiency. PhD Thesis, SRTTU, 2022.
- [17] Sze SM. *Semiconductor devices: physics and technology*. John Wiley & Sons, 2008.
- [18] Hedayati M, Olyaei S. Proposal of CIGS dual-junction solar cell and investigation of different metal grids effect. *Optical and Quantum Electronics*. 2020 Jul;52:1-2.
- [19] Hedayati M, Olyaei S. High-Efficiency pn Homojunction Perovskite and CIGS Tandem Solar Cell. *Crystals*. 2022 May 15;12(5):703.
- [20] Kumar A, Singh S, Mohammed MK, Shalan AE. Computational modelling of two terminal CIGS/perovskite tandem solar cells with power conversion efficiency of 23.1%. *European journal of inorganic chemistry*. 2021 Dec 21;2021(47):4959-69.

### پی نوشت

1. Vertical Multijunction
2. Lateral Multijunction
3. Exciton
4. Homojunction
5. Beer-Lambert

آزمایشگاهی این سلول خورشیدی و بهینه‌سازی آن انجام خواهد شد.

### سپاسگزاری

از زحمات کارکنان دانشکده مهندسی برق و آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک که در انجام دادن این پژوهش ما را یاری رساندند، سپاسگزاری می‌کنیم.

### مراجع

- [1] Tao CS, Jiang J, Tao M. Natural resource limitations to terawatt-scale solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011 Dec 1;95(12):3176-80.
- [2] Sabet MT, Daniali HM, Fathi A, Alizadeh E. A low-cost dead reckoning navigation system for an AUV using a robust AHRS: Design and experimental analysis. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2017 Dec 4;43(4):927-39.
- [3] علمی عزیز حانیه، محسنی آراسته افشین. طراحی و پیاده‌سازی یک الگوریتم تعیین توجیه (AHRS) مستقل بر مبنای حسگرهای میکروالکترومکانیکی برای شرایط دینامیک بالا در سامانه‌های ناوبری. *هیدروفیزیک*. ۱۴۰۰؛ ۷(۱):۱۰۶-۹۳.
- [4] Bedair SM, Lamorte MF, Hauser JR. A two-junction cascade solar-cell structure. *Applied Physics Letters*. 1979 Jan 1;34(1):38-9.
- [5] Polman A, Atwater HA. Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics. *Nature materials*. 2012 Mar;11(3):174-7.
- [6] Mohammadnejad S, Jouyandeh Abkenar N, Bahrami A. Normal distribution profile for doping concentration in multilayer tunnel junction. *Optical and Quantum Electronics*. 2013 Aug;45(8):873-84.
- [7] Dimroth F. High-efficiency solar cells from III-V compound semiconductors. *physica status solidi c*. 2006 Mar;3(3):373-9.
- [8] Jianmin H, Yiyong W, Jingdong X, Dezhuang Y, Zhongwei Z. Degradation behaviors of electrical properties of GaInP/GaAs/Ge solar cells under < 200 keV proton irradiation. *Solar energy materials and solar cells*. 2008 Dec 1;92(12):1652-6.
- [9] Rafat NH. A simple analytical treatment of edge-illuminated VMJ silicon solar cells. *Solar energy*. 2006 Dec 1;80(12):1588-99.
- [10] Alam MK, Khan F, Imtiaz AM. Optimization of subcell interconnection for multijunction solar cells using switching power converters. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2012 Nov 15;4(2):340-9.