



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

[20.1001.1.23223146.1400.8.1.6.5](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1400.8.1.6.5)

ژurnal فصلنامه علمی و پژوهشی

دوره ۸ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۰

صفحات ۵۷ الی ۷۶

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

بازتابنده پستی بهینه برای سلول‌های خورشیدی لایه نازک با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ژنتیک

مجتبی احمدی^۱ و علی بهرامی^۲

آزمایشگاه تحقیقاتی الکترونیک نوری و نانو فوتونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند،
mojtaba.ahmadi1990@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، آزمایشگاه تحقیقاتی الکترونیک نوری و نانو فوتونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه
صنعتی سهند، bahrami@sut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸)

چکیده

در این مقاله، ساختاری براساس توری پراش جهت استفاده به عنوان بازتاب کننده پستی در سلول‌های خورشیدی لایه نازک پیشنهاد شده است. توری پراش باعث می‌گردد که فوتون‌ها در اثر برخورد به این ساختار، مسیر طولانی‌تری را طی نمایند که موجب افزایش طول مسیر نوری فوتون‌ها و افزایش جذب سلول و در نتیجه بهبود بازده سلول می‌گردد. در هر یک از ساختارهای مذکور، به تعیین مواد بهینه و خصوصیات هندسی برای رسیدن به حداکثر بازده سلول سیلیکونی پرداخته شده است. در یافتن پارامترهای هندسی بهینه برای ساختار، از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده شده است. با انتخاب بهترین روش‌های جستجو از دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ژنتیک و ایجاد ترکیبی از آن دو، ویژگی‌های مثبت هر دو الگوریتم برای دستیابی به بهترین پاسخ به کار گرفته شد. این ترکیب نتایج بسیار مثبتی ایجاد کرده است که در نتیجه آن ۲۳/۲۹۳ درصد بازده و جریان اتصال کوتاه ۳۵/۴۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی

سلول خورشیدی لایه نازک،
به دام اندازی نور،
بهینه‌سازی ازدحام ذرات،
الگوریتم ژنتیک.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1400.8.1.6.5](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1400.8.1.6.5)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.8, No.1

Spring and Summer 2021

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

Optimized Back Reflector for Thin Film Solar Cells using PSO and Genetic Algorithms

Mojtaba Ahmadi¹ and Ali Bahrami²

¹Optoelectronics and Nanophotonics Research Lab. (ONRL), Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran,
mojtaba.ahmadi1990@gmail.com

² **Corresponding author**, Optoelectronics and Nanophotonics Research Lab. (ONRL), Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran,
bahrami@sut.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Thin film solar cells,
Light trapping,
Particle swarm optimization,
Genetic algorithm.

In this paper, a novel structure based on diffraction grating is proposed to be used as the back reflector in thin film solar cells. The diffraction grating causes the photons to pass a longer path due to the collision with this structure, which increases the length of the light path of photons and cell absorption coefficient and improves the cell efficiency. In all of the mentioned structures, optimal materials and geometric properties are used to achieve maximum efficiency of silicon cells. Intelligent optimization methods are used to find the optimal geometric parameters for the structure. By choosing the best search methods from particle swarm optimization and genetic algorithms and combining them, the positive features of both algorithms are used to achieve the enhanced results. This combination presents excellent results, where the efficiency of 23.293% and short circuit current of 35.41 mA/cm² are obtained.

۱- مقدمه

در دنیای کنونی در حالی که اقتصاد جهانی کاملاً وابسته به انرژی می‌باشد، حتی اگر معایب سوخت‌های فسیلی را هم در نظر نگیریم، تا یک‌صد سال دیگر موادی مثل نفت خام و گاز به پایان می‌رسند و زغال‌سنگ نیز حداکثر تا دو قرن دیگر پاسخگوی بخشی از نیاز شدید انسان به انرژی خواهد بود. از سوی دیگر انرژی‌های نو معایب سوخت‌های فسیلی را ندارند، علاوه بر این منابع تولید آن‌ها تمام ناشدنی و نامحدود است [۱]. خورشید منبع عظیم انرژی سرآغاز حیات و منشأ تمام انرژی‌های دیگر است. اثر فتوولتائیک تبدیل نور خورشید به الکتریسیته از طریق یک سلول فتوولتائیک می‌باشد، که به‌طور معمول یک سلول خورشیدی نامیده می‌شود. وقتی فوتون‌ها به یک سلول خورشیدی برخورد می‌کنند، ممکن است منعکس شوند، مستقیم از میان آن عبور کنند، یا جذب شوند. فقط فوتون‌های جذب‌شده انرژی را برای تولید الکتریسیته فراهم می‌کنند [۱].

سلول‌های خورشیدی ادوات نیم رسانایی هستند که می‌توانند انرژی نورانی را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. در این بین با توجه به فراوانی سیلیکون، هزینه به‌مراتب کم‌تر و تولید آسان‌تر آن مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. از آنجایی که سلول توسط فوتون‌هایی با دامنه انرژی‌های متفاوت مورد هدف قرار می‌گیرد لذا برخی از فوتون‌ها انرژی بسیار زیادی دارند و تنها میزان مشخصی از انرژی می‌تواند بر الکترون‌های اتم‌های سیلیکون اثر بگذارد، اگر فوتونی انرژی بیش از میزان لازم داشته باشد پس انرژی اضافی هدر می‌رود به این صورت است که درصد بسیار بالایی از انرژی تابشی دریافتی توسط سلول تلف می‌شود و کارایی ندارد. امروزه اکثر سلول‌های خورشیدی موجود در بازار بر اساس سلول سیلیکون کریستالی با قطر بین ۱۸۰-۳۰۰ میکرومتر می‌باشد. از مشکلات سلول‌های با ضخامت بالا، بازترکیب حامل‌ها با توجه به ضخامت زیاد ناحیه جذب و مصرف فراوان سیلیکون در آن را می‌توان نام برد. بنابراین برای کاهش هزینه‌های ساخت از تکنولوژی لایه نازک استفاده می‌شود [۳، ۴]. همچنین به دلیل شکاف باند غیرمستقیم سیلیکون و طول جذب بالای فوتون‌ها، در سلول‌های خورشیدی لایه نازک نیز بخش قابل توجهی از نور به دلیل جذب ناکافی مادون قرمز در محدوده طول موجی ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر از دست می‌رود. بنابراین کاهش در هزینه به‌دست آمده به‌وسیله استفاده از بسترهای سیلیکونی بسیار نازک با کاهش در بازده ختنی می‌شود [۵]. عوامل مختلفی وجود دارد که موجب اتلاف انرژی نوری در سلول‌های خورشیدی می‌شود که مشکلاتی در کاهش بازده به وجود می‌آورد؛ این موارد با استفاده از روش‌های به دام اندازی نور تا حد زیادی قابل جبران می‌باشند. افزایش به‌دام اندازی نور یک مسیر اصلی برای بهبود اثربخشی سلول خورشیدی لایه نازک است. به‌منظور کاهش این نوع از تلفات، با استفاده از بازتابنده‌های پستی در انتهای سلول فوتون‌ها را به داخل ناحیه جذب بازتاب می‌کنند، این عمل طول مسیر حرکت فوتون‌ها را در ناحیه جذب افزایش داده و احتمال جذب را بیشتر می‌کند. از عوامل دیگر کاهش راندمان، فوتون‌هایی هستند که به علت اختلاف ضریب دی‌الکتریک هوا و سلول و با توجه به زاویه تابش از سطح سلول بازتاب می‌شوند، برای کاهش بازتاب نور در سطح سلول از پوشش‌های ضدبازتاب استفاده می‌شود.

طراحی ساختارهای سلول خورشیدی در کل مشتمل بر طراحی ساختار داخلی سلول خورشیدی (بخش جاذب)، ساختارهای سطح رویی (روکش‌های ضدبازتاب)، ساختارهای بازتابنده پستی و طراحی و بهینه‌سازی فرایند رشد لایه‌ها و ساخت سلول (بصورت عملی) می‌باشد. در تمامی این مراحل نیز نوع سلول خورشیدی و ویژگی‌های ماده جاذب اصلی اهمیت بالایی دارد. بهینه‌سازی روش‌ها و فرایند ساخت سلول‌های خورشیدی [۶، ۷] و نیز ساختارهایی برای سطح رویی سلول، به منظور تله اندازی اولیه نور [۵] و

همچنین فرایند بهینه‌سازی ضخامت لایه‌های داخلی ساختارهای چندلایه [۸] از جمله کارهایی است که در زمینه سلول‌های خورشیدی انجام می‌پذیرد. ما در این کار بیشتر بر روی بهینه‌سازی ساختار پستی سلول خورشیدی و برگشت فوتون به داخل سلول جهت بهره‌برداری بیشتر متمرکز شده ایم.

در سال ۱۹۹۵ ساختارهایی از توری پراش معرفی شد که در این ساختارها از یک لایه جاذب ۵ میکرومتری و پوشش بازتابنده سه لایه از SiO_2 ، TiO_2 و SiO_2 بر روی لایه جاذب استفاده شده بود، که منجر به بازتاب میانگین کمتر از ۶ درصد گردید [۹]. در سال ۲۰۰۶ یک بازتابنده شامل یک توری پراش بر روی یک بستر از بازتابنده براگ توانست کارایی سلول را به میزان قابل توجهی بهبود دهد [۱۰]. در سال ۲۰۰۷ یک طراحی بهینه از ساختار به‌دام‌اندازنده نور با بازده بالا در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی لایه‌نازک ارائه شد. این ساختار از یک پوشش ضدبازتاب، و همچنین یک بازتابنده پستی که از ترکیب یک بازتابنده براگ و یک توری پراش برای سلول خورشیدی سیلیکونی است تشکیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بازده سلول با ضخامت ۲ میکرومتر با استفاده از ساختار به‌دام‌اندازنده نور به میزان ۱۲ درصد بهبود یافت [۵]. زنگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ طراحی ساختار به‌دام‌اندازنده نور را برای سلول سیلیکونی با ضخامت ۵ میکرومتر ارائه دادند. در این طراحی نیز از یک بازتابنده پستی مرکب از براگ و توری پراش و یک پوشش ضدبازتاب بر روی سلول استفاده شده است. در این ساختار بازده سلول ۸/۸۲ درصد و چگالی جریان اتصال کوتاه ۱۷/۴۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به دست آمده است [۱۱]. یسینگ و مارتین در سال ۲۰۱۰ یک طرح به‌دام‌اندازی نور متشکل از یک توری پراش دوبعدی و یک اتصال پستی آلومینیومی که به وسیله یک جداکننده از توری جدا شده است را ارائه دادند که آن را با یک طرح دوبعدی با پوشش ضدبازتاب و یک اتصال پستی آلومینیومی به‌عنوان آینه یک‌طرفه از مرجع دیگر مقایسه کرده و برای نورتابشی عمود مورد بررسی قرار داده است. در تابش عمود چگالی جریان اتصال کوتاه ۱۷ درصد بهتر شد، و از ۳۰/۴ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به ۳۵/۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع برای یک سلول خورشیدی سیلیکونی لایه‌نازک با ضخامت ۲۰ میکرومتر افزایش یافته است [۱۲]. در سال ۲۰۱۲ یک ساختار دوطرفه سلول خورشیدی با توری پراش معرفی شد. این ساختار دوبعدی از یک لایه جاذب سیلیکونی و یک لایه بازتابنده سیلیکون اکساید با اتصال پستی نقره استفاده می‌کرد. در این ساختار چگالی جریانی برابر ۳۴/۶ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع برای سلول با ضخامت ۲ میکرومتر به دست آمده است [۱۳]. در سال ۲۰۱۵ مدلی از طراحی به‌دام‌اندازنده نور دوگانه با ساختار نانوتوری از اکسید آلومینیوم در دو سطح پشت و روی سلول ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی آن نشان داد که ساختار تله نور دوگانه می‌تواند جذب نور را در طول موج‌های ۲۸۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر بسیار افزایش دهد [۱۴]. توانبخش و همکاران در سال ۲۰۱۵ طراحی جدیدی از ساختار به‌دام‌اندازنده نور در سلول خورشیدی ارائه دادند. در این طراحی از یک بازتابنده پستی استفاده شده که شامل یک ساختار توری که در داخل آن از بازتابنده براگ استفاده شده است. در طراحی انجام‌شده در نهایت بازده ۲۲/۰۴ درصد با چگالی جریان ۳۳/۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به دست آمده است [۱۵]. دهدست و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷ طراحی جدیدی با فرایند بهینه‌سازی برای بهبود شبکه‌های پراش مطرح کردند. در این طراحی نوع ماده و پارامترهای مهم توری پراش بررسی شد. در بهترین حالت با یک ساختار توری پراش دوزنقه‌ای توانستند میزان بازده سلول را ۶ درصد افزایش دهند. در نهایت در این طراحی بازده ۲۲/۱ درصد با چگالی جریان ۳۳/۶ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع برای یک سلول سیلیکونی ۵ میکرومتری به دست آمد [۱۶].

در بخش ۲ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و بخش ۳ الگوریتم ژنتیک بررسی و معادلات مربوط به پیاده‌سازی آن‌ها بیان می‌شود، و همچنین ویژگی‌های ترکیب دو الگوریتم در بخش ۴ بیان می‌شود. سپس در بخش ۵ روش شبیه‌سازی معادلات مربوط به شبیه‌سازی سلول بیان می‌شود. در بخش ۶ الگوی اولیه ایجاد شده در طراحی ساختار سلول خورشیدی تحلیل و معادلات و شرایط مربوط به این مدل در بهینه‌سازی بیان می‌شود. و شرایط الگوریتم برای در نظر گرفتن شرایط ساخت گفته می‌شود. در بخش ۷ نتایج و بحث نتایج حاصل از جستجوی الگوریتم‌ها قرار داده می‌شود. در بخش ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی سلول برای سلول بهینه حاصل از بخش قبل قرار داده شده و با نتایج سلول در حالت بدون توری و توری ساده مقایسه می‌شود. و در نهایت نتیجه حاصل از خطاهای ساخت قرار داده شده است.

۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

۲-۱- الگوریتم PSO

در سال ۱۹۹۵ کندی و ابرهارت برای اولین بار PSO را به‌عنوان یک روش جستجوی غیرقطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح کردند. این الگوریتم از حرکت دسته‌جمعی پرندگان که به دنبال غذا می‌باشند، الهام گرفته شده است. با حرکت ذره (پرنده) در طول زمان موقعیت ذره تغییر می‌نماید. $x_i(t)$ موقعیت ذره i ام در زمان t را مشخص می‌نماید. با افزودن سرعت به موقعیت هر ذره، می‌توان موقعیت جدیدی برای ذره در نظر گرفت. سرعت هر ذره با $v_i(t)$ مشخص می‌شود. با توجه به این که جهت حرکت یک بردار است و سرعت مماس بر جهت حرکت در یک بردار است بنابراین جابجایی در یک جهت به‌عنوان بردار سرعت تعریف می‌شود. بنابراین با توجه به موارد گفته‌شده معادله حرکت یک ذره در فضای جستجو به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۷-۱۹]:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(x_{i,best}(t) - x_i(t)) + c_2r_2(x_{g,best}(t) - x_i(t)) \quad (1)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2)$$

در رابطه (۱) $v_i(t+1)$ سرعت در لحظه بعد می‌باشد که از جمع سه بردار تشکیل شده است. در قسمت اول w ضریبی از سرعت فعلی (ضریب اینرسی) و در قسمت دوم c_1 ضریبی از جابجایی در راستای بهترین خاطره شخصی است و r_1 یک ضریب تصادفی بین صفر تا یک می‌باشد. در قسمت سوم c_2 ضریبی از جابجایی در راستای بهترین خاطره جمعی، و r_2 نیز یک ضریب تصادفی بین صفر تا یک می‌باشد. در نهایت با به دست آوردن سرعت از رابطه (۱) و جایگذاری در رابطه (۲) موقعیت جدید ذره به دست می‌آید. به بهترین خاطره یا تجربه فردی یک ذره یا بهترین موقعیت ملاقات شده توسط ذره i ام، $x_{i,best}$ گفته می‌شود [۱۸]، [۱۹].

۲-۲- الگوریتم ژنتیک

در دهه ۱۹۷۰ میلادی دانشمندی از دانشگاه میشیگان به نام جان هنری هلند ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک را در بهینه‌سازی‌های مهندسی مطرح کرد. ایده اساسی این الگوریتم انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن‌ها است. الگوریتم ژنتیک را می‌توان یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین فرگشت بیولوژیک طبیعی تقلید می‌کند. این الگوریتم، تقریبی از آنچه که در دنیای واقعی اتفاق افتاده است، می‌باشد [۲۰، ۲۱].

۲-۲-۱- انتخاب جمعیت برای تولید فرزندان (انتخاب والدین)

اعضای جمعیت معمولاً به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند [۲۰, ۲۲].

$$n_C = 2 \left[\frac{p_C n_{pop}}{2} \right] \quad (۳)$$

$$n_m = \lceil p_m n_{pop} \rceil \quad (۴)$$

در اینجا p_C ضریبی برای کنترل جمعیت فرزندان می‌باشد که به صورت $0 \leq p_C \leq 1$ تعریف می‌شود. n_C تعداد فرزندان یا تعداد والدینی که برای تولید مثل انتخاب می‌شوند، است. n_m تعداد اعضا یا والدین برای اعمال جهش است و p_m به صورت $0 \leq p_m \leq 1$ می‌باشد [۲۰, ۲۲-۲۴].

برای انتخاب والد در اینجا از روش انتخاب بر اساس شایستگی یا رتبه (چرخ رولت 'RWS') استفاده شده است [۲۵, ۲۶].

۲-۲-۲- تولیدمثل

عمل تقاطع در این الگوریتم به منظور تبادل خواص بین والدین انجام می‌گیرد تا شاید به نتیجه بهتری منجر گردد. کروموزوم‌های والدین به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [۲۰, ۲۷].

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_{n_{var}}) \Leftrightarrow x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \quad (۵)$$

اگر دو کروموزوم x_1 و x_2 به عنوان والد از جمعیت اصلی انتخاب شود، ماسکی با مقداری حقیقی، به تصادف برای هر یک از مولفه‌های آن تولید می‌شود؛

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_{var}}) \Leftrightarrow -\gamma \leq \alpha \leq 1 + \gamma \quad (۶)$$

$$\begin{cases} y_{1i} = \alpha_i x_{1i} + (1 - \alpha_i) x_{2i} \\ y_{2i} = \alpha_i x_{2i} + (1 - \alpha_i) x_{1i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_1 = (y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n_{var}}) \\ y_2 = (y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n_{var}}) \end{cases} \quad (۷)$$

با اعمال ماسک، y_1 و y_2 فرزندان می‌باشند که در نتیجه ترکیب والدین تولید می‌شوند. برای اینکه فرزندان بتوانند از محدوده والدین فراتر روند تا جواب‌های بهتری را در مسائل بیابند هر مولفه α_i را به صورت رابطه (۶) تعریف می‌کنند. مقدار γ با توجه به نوع مسئله یک مقدار کوچک در نظر گرفته می‌شود [۲۲, ۲۸].

۲-۲-۳- جهش

برای جهش در این روش ژن جدید برای تغییر در کروموزوم والد با استفاده از یک توزیع رندم انتخاب می‌شود و با اعمال آن بر روی والد تولید می‌گردد [۲۰]؛

^۱ Roulette Wheel Selection (RWL)

$$x_i^{new} \approx p(x) \Leftrightarrow x \in [x_{\min}, x_{\max}] \quad (۸)$$

$$x_i^{new} \approx N(x_i, \sigma^2) \quad (۹)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که x_i^{new} دارای یک توزیع نرمال با میانگین x_i و واریانس σ^2 می‌باشد.

۲-۲-۴- ارزیابی یا محاسبه برازندگی در تابع هدف (تابع ارزش)

تابع هدف شاخصی از نحوه عملکرد افراد در فضای مسئله می‌باشد. جمعیت، ذرات و یا راه‌حل‌ها در هر تکرار الگوریتم باید ارزیابی شوند که تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف، (NFE)، به صورت زیر است؛

$$NFE = n_{pop} + (n_C + n_m)it \quad (۱۰)$$

$$NFE = n_{pop}it \quad (۱۱)$$

رابطه بالا تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف در الگوریتم ژنتیک و PSO می‌باشد. پارامتر it تعداد تکرارهای الگوریتم می‌باشد.

۲-۳- ترکیب الگوریتم ژنتیک و PSO

الگوریتم PSO دارای ویژگی‌های جذابی مثل حافظه است، به عبارتی دانش راه‌حل‌های مناسب توسط همه ذرات حفظ شده و در میان کل گروه ذرات به اشتراک گذاشته می‌شود، اما توانایی تولید ذرات جدیدی در محدوده‌های خارج از محدوده ذرات کل گروه را ندارد و نهایتاً جستجوی الگوریتم در همان محدوده گروه ذرات خلاصه می‌شود. از سوی دیگر الگوریتم ژنتیک قابلیت ایجاد جمعیت‌های جدید با ویژگی‌های جدیدتر از اعضای قبل در موقعیت‌های خارج از محدوده کل جمعیت را توسط اعمال تقاطع و جهش ایجاد می‌کند. برخلاف PSO در ژنتیک ممکن است دانش قبلی در حل مسئله پس از تغییرات جمعیت دور ریخته شود. بنابراین برای این که بتوان از ویژگی‌های مثبت هر دو الگوریتم استفاده شود و نقاط ضعف آن‌ها پوشش داده شود، در این کار از ترکیب این دو الگوریتم استفاده شده است.

۳- روش شبیه‌سازی سلول خورشیدی

بازده تبدیل توان سلول خورشیدی با استفاده از رابطه زیر به ولتاژ مدار باز V_{OS} ، جریان اتصال کوتاه I_{SC} ، ضریب پرشدگی

FF و توان کل نور فرودی به سلول، P_{in} ، مربوط می‌شود [۲۹]؛

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (۱۲)$$

طیف جذب‌شده کل در ساختار از جمع طیف جذب‌شده در هر لایه $(A_i(\lambda))$ ، با رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$A(\lambda) = \sum_i A_i(\lambda) \quad (۱۳)$$

بازده کوانتومی خارجی (EQE) با رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$EQE(\lambda) = \sum_i \eta_i A_i(\lambda) \quad (14)$$

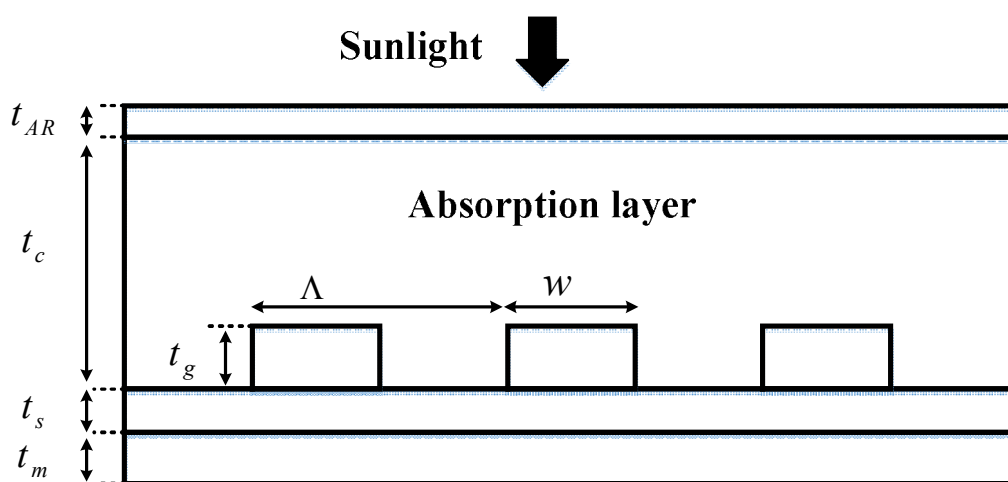
چگالی جریان اتصال کوتاه با واحد آمپر بر مترمربع از رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

$$J_{SC} = eN_{e-h} \quad (15)$$

در رابطه بالا N_{e-h} تعداد کل جفت الکترون-حفره‌هایی می‌باشد که توسط الکتروود جمع می‌شود.

۴- فرآیند طراحی

در این مقاله شبیه‌سازی‌های انجام شده روی یک سلول خورشیدی سیلیکونی با لایه جذب ۵ میکرومتر می‌باشد. ساختار اولیه سلول در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. ساختار اولیه سلول خورشیدی لایه نازک، شامل یک توری پراش مستطیلی، در این ساختار t_{AR} ضخامت لایه ضد بازتاب، t_C ضخامت لایه جذب، t_g عمق توری پراش، t_s ضخامت زیر لایه توری پراش، t_m ضخامت فلز پشت سلول، W عرض دندانه توری و Λ دوره تناوب توری می‌باشد.

در ساختار اولیه از یک ساختار ساده توری پراش به شکل مستطیلی استفاده شده است. در شکل ۱ از یک ساختار ساده توری پراش به شکل مستطیلی استفاده شده است. برای این ساختار در ابتدا پارامترهای اولیه آن به صورت زیر تعیین شده است:

۴-۱- پوشش ضد بازتاب

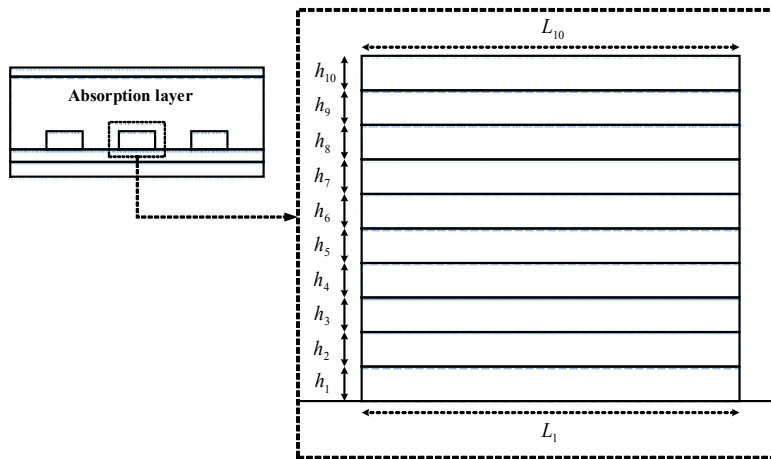
با توجه به لایه جذب سیلیکونی ضریب شکست پوشش ضد بازتاب متناسب با ضریب شکست لایه جذب n_c انتخاب شده است [۳۰]. ضریب شکست پوشش ضد بازتاب تقریباً برابر $n_{AR} = 1.9$ و با توجه به نزدیکی این ضریب شکست به ضریب شکست ITO از این ماده استفاده شده است [۳۱, ۳۲]. ضخامت این لایه نیز با انجام اسکن در بهینه‌ترین حالت برابر ۷۵ نانومتر به دست آمده است.

۴-۲- اتصال پستی سلول

با توجه به رسانایی مطلوب، قیمت پایین و همچنین ساخت آسان، از فلز آلومینیوم استفاده شده است [۲۹، ۳۳]. ضخامت بهینه این لایه با انجام اسکن برابر ۲۴۵ نانومتر به دست آمده است.

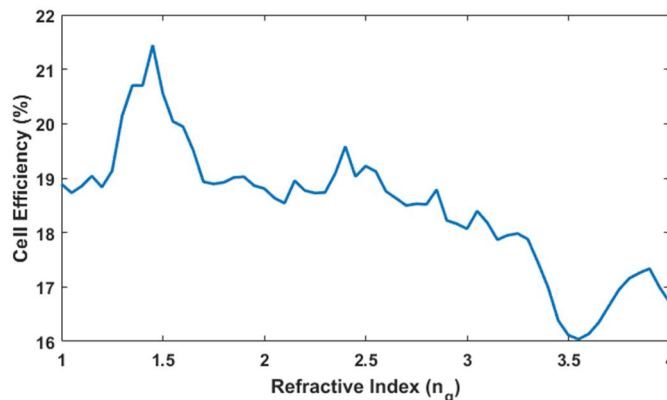
۴-۳- توری پراش

پراش نور حاصل از تعدادی اشیا که به صورت متناوب قرار دارند، منجر به افزایش طول مسیر سیر فوتون در یک سلول و افزایش جذب می‌گردد. در این مقاله برای بررسی، کلی شکل‌های یک توری پراش برای ایجاد بیشترین بازده آن به صورت تعدادی لایه مجزا در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. توری پراش به صورت ۱۰ لایه تعریف شده است. هر کدام از لایه‌ها از لایه ۱ تا ۱۰ دارای ارتفاع h_1 تا h_{10} و دارای عرض L_1 تا L_{10} می‌باشند.

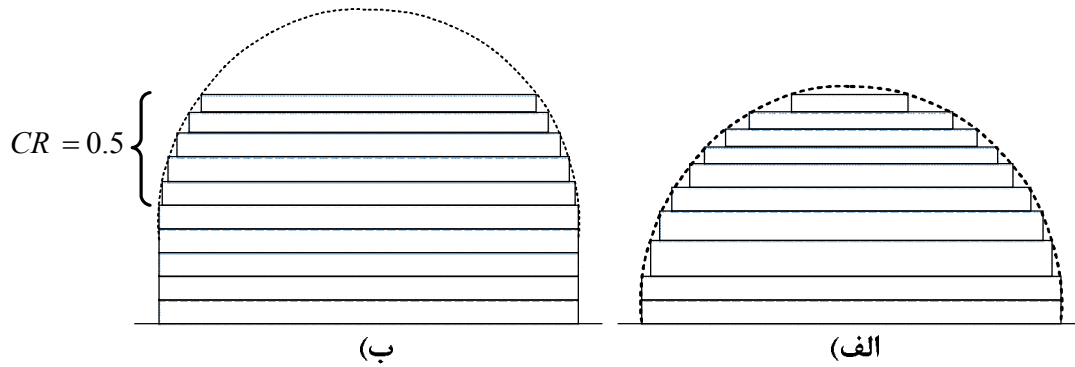
هر کدام از این لایه‌ها دارای ارتفاع و عرض خاصی می‌باشند که در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای تعیین نوع ماده توری پراش، در نتیجه اسکن ضریب شکست برای ساختار ساده توری پراش موجود در شکل ۱، نمودار موجود در شکل ۳ حاصل شده است.



شکل ۳. نمودار اسکن ضریب شکست توری پراش در مقابل تغییرات بازده سلول، بهترین بازده به ازای ضریب شکست $n_g = 1.45$ در ساختار شکل ۱ به دست آمده است.

در این نمودار بهترین بازده سلول به ازای ضریب شکست $n_g = 1.45$ برای توری پراش به دست آمده است. با توجه به این نتیجه نزدیک‌ترین ماده به این ضریب شکست در طول موج مرکزی نور خورشید SiO_2 می‌باشد [۲۴-۳۶].

در این مقاله ساختار شکل ۲ در زیر سلول شکل ۱ به جای توری پراش استفاده شده تا با قرار دادن پارامترهای بهینه برای توری پراش (پارامترهای توری موجود در این دو شکل) به بیشترین میزان بازده دست یابیم. در این بررسی علاوه بر پارامترهای توری پراش پارامتر دیگری بنام CR بررسی می‌شود. این پارامتر ضریبی است که درصد دایروی بودن شکل توری پراش را تعیین می‌کند، که نمونه استفاده از آن در شکل ۴ الف وقتی برابر ۱۰۰ درصد و شکل ۴ ب وقتی برابر ۵۰ درصد می‌باشد، نمایش داده شده است.



شکل ۴. ساختار توری پراش، الف) ۱۰۰ درصد لایه‌ها شکل دایروی به خود گرفته‌اند، ب) ۵۰ درصد لایه‌ها شکل دایروی دارند.

۴-۴- پارامتر نرخ دایروی CR

CR در این ساختار پارامتری است که فقط روی عرض لایه‌ها (L_j ها) تاثیر می‌گذارد. وقتی این ضریب روی لایه‌ها اعمال می‌شود از اولین لایه تا آخرین لایه متناسب با ارتفاع هر لایه، ارتفاع کل ساختار توری و ضریب دایروی با رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$L_j = 2 \left[\left(1 - \left(\frac{\sum_{N_s}^j h_j}{H} \right)^2 \right) \left(\frac{L_{N_s+1}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \Leftrightarrow j \in \{N_s, \dots, N_L\} \quad (16)$$

$$H = \sum_{i=1}^{N_L} h_i \Leftrightarrow i \in \{1, 2, \dots, N_L\} \quad (17)$$

در رابطه (۱۶) L_j طول j امین لایه توری بیضوی، H ارتفاع کل توری پراش که از رابطه (۱۷) از جمع کل ارتفاع لایه‌های توری (h_i ها) به دست می‌آید. N_L تعداد کل لایه‌های توری، N_s شماره لایه‌ای است که با توجه به نرخ CR بیضوی شدن شکل لایه‌های توری بعد از آن لایه شروع می‌شود، که در اینجا برابر $N_s = N_L - N_c$ و N_c تعداد لایه‌های قسمت بیضوی توری است که از جز صحیح ضرب N_L در CR به صورت رابطه (۱۸) به دست می‌آید؛

$$N_c = [CR \times N_L] \Leftrightarrow N_c \in \mathbb{N} \quad (18)$$

با توجه به مطالبی که گفته شد کل پارامترهای توری پراش که در این کار بررسی می‌شود شامل پارامترهای لایه‌های توری (ارتفاع و عرض)، ارتفاع زیرلایه توری، دوره تناوب توری و نرخ بیضوی شدن توری می‌باشد که تعداد کل آن‌ها با احتساب ۱۰ لایه از توری پراش برابر ۲۳ پارامتر می‌باشد.

۴-۵- شرایط ساخت

با توجه به شرایط ساخت در تعریف تابع هدف سه قید برای در نظر گرفتن امکان ساخت توری پراش لحاظ شده است. قید اول مربوط به آن است که در توری پراش هیچ‌گاه نباید عرض لایه بالاتر L_{i+1} بزرگ‌تر از لایه پایین‌تر L_i در نظر گرفته شود. برای در نظر گرفتن این قید جستجوی الگوریتم برای عرض لایه بعدی در محدوده لایه قبل انجام شده است. قید دوم مربوط به اختلاف لایه‌های توری نسبت به یکدیگر است. در هنگام ساخت ایجاد اختلاف پلکانی خیلی کوچک میان دو لایه بسیار مشکل می‌باشد که هزینه‌های زیاد ساخت را به دنبال خواهد داشت و یا حتی در مواردی ممکن است اصلاً امکان ساخت آن فراهم نباشد. بنابراین در این کار پارامتری به نام L_{etch} تعریف شده است، سپس قیدی تعریف شد که هرگاه اختلاف بین عرض دو لایه کمتر از مقدار L_{etch} شد لایه بعدی برابر لایه قبل خواهد شد ($L_{i+1} = L_i$). با توجه به شرایط گفته شده در بالا این امکان وجود دارد که آخرین لایه هرم توری مقدار کوچکی داشته باشد و شرایط ساخت آن فراهم نباشد، در این صورت مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته شده است. موارد گفته شده در این سه قید به‌طور کلی در رابطه (۱۹) در نظر گرفته شده است.

$$L_{i+1} = \begin{cases} 0 & \rightarrow L_{i+1} \leq 5 \times L_{etch} \\ L_{i+1} & \rightarrow 5 \times L_{etch} < L_{i+1} \leq L_i - L_{etch} \\ L_i & \rightarrow L_{i+1} > L_i - L_{etch} \end{cases} \quad (19)$$

در شبیه‌سازی L_{etch} برابر ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. لایه‌هایی که مقدار آن‌ها صفر در نظر گرفته شده در فرایند طراحی لحاظ نخواهند شد. خطای ساخت سلول نیز در نمودار شکل ۱۳ برای تغییرات ۳ نانومتری در ابعاد لایه‌های توری محاسبه شده است که تاکید بر حساسیت کم توری به خطاهای ساخت دارد.

در مقداردهی اولیه یا تولید پاسخ اولیه مدل‌هایی از مسئله به‌صورت تصادفی با توجه به ۲۳ پارامتر گفته شده ایجاد شد.

جدول ۱. پارامترهای مسئله و بازه تغییرات آن‌ها.

Parameter	h_i	L_i	Λ	CR	t_s
Maximum	100 nm	600 nm	1000 nm	1	700 nm
Minimum	10 nm	0	600 nm	0	20 nm

پارامترهای مسئله در یک بازه اعداد پیوسته مطابق جدول ۱ انتخاب شده است. تعداد پاسخ‌های اولیه برای این کار متناسب با ابعاد مسئله و زمان شبیه‌سازی برابر ۵۰ انتخاب شده است.

از آنجایی که در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چگونگی پاسخ‌های اولیه که به صورت تصادفی ایجاد می‌شوند در زمان یا تعداد تکرارها برای رسیدن به بهینه‌ترین جواب و یا عبور از بهینه‌های محلی تاثیرگذار هستند، برای این کار از یک پاسخ اولیه ثابت که به صورت کاملاً تصادفی ایجاد شده، استفاده شده است. در این صورت می‌توان نحوه عملکرد الگوریتم‌ها را در سرعت رسیدن به جواب و یا عبور از بهینه‌های محلی با یکدیگر مقایسه کرد.

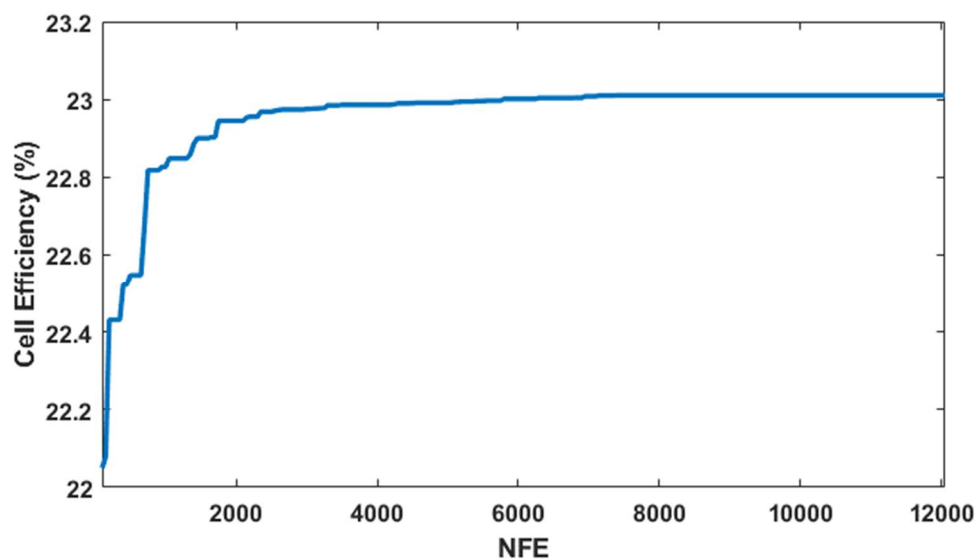
۵- نتایج و بحث

نتیجه حاصل از جستجوی الگوریتم شبیه‌سازی PSO در جدول ۲ و نمودار شکل ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای به دست آمده از الگوریتم PSO در بازه ۰.۱/۲۳ درصد.

Parameter	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8
Value	0.047	0.067	0.022	0.051	0.04	0.039	0.036	0.053
Parameter	h_9	h_{10}	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Value	0.053	0.041	0.582	0.563	0.461	0.285	0.285	0.285
Parameter	L_7	L_8	L_9	L_{10}	Λ	CR	t_s	
Value	0.2	0.2	0.2	0.187	0.757	0.294	0.05	

بهینه‌ترین پاسخی که الگوریتم PSO توانست معرفی کند بعد از ۱۴۴ تکرار، به ازای مقادیر پارامترهای جدول ۲، بازه ۰.۱/۲۳ برای سلول خورشیدی می‌باشد. پارامترهای موجود در جدول بر حسب میکرومتر می‌باشند (غیر از CR که بدون واحد می‌باشد).



شکل ۵. نمودار عملکرد الگوریتم PSO بر حسب بازه سلول

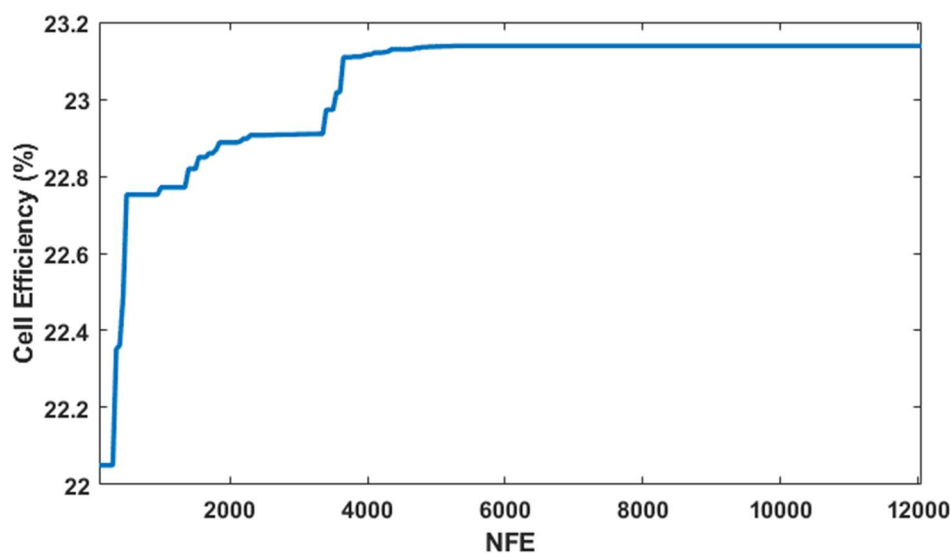
نمودار شکل ۵ بازده سلول را در ۲۴۰ تکرار از الگوریتم PSO نشان می‌دهد که در هر تکرار ۵۰ بار تابع هدف فراخوانی شده است. NFE تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف می‌باشد.

نتیجه حاصل از اجرای الگوریتم شبیه‌سازی ژنتیک در جدول ۳ و نمودار شکل ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۳. پارامترهای به دست آمده از الگوریتم GA در بازده ۲۳/۱۳۸ درصد.

Parameter	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8
Value	0.064	0.020	0.023	0.063	0.067	0.053	0.059	0.061
Parameter	h_9	h_{10}	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Value	0.059	0.067	0.6	0.6	0.497	0.428	0.407	0.327
Parameter	L_7	L_8	L_9	L_{10}	Λ	CR	t_s	
Value	0.327	0.311	0.297	0.273	0.911	0.547	0.57	

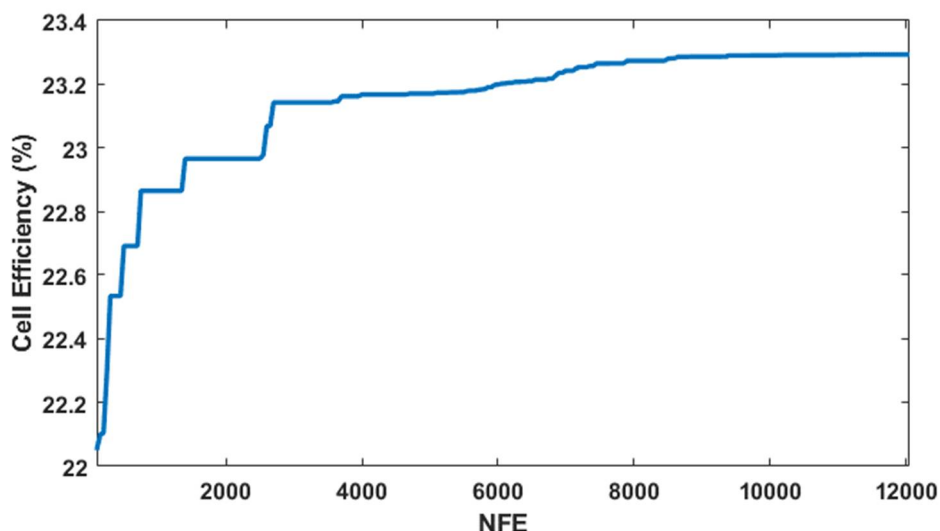
بهینه‌ترین پاسخی که الگوریتم ژنتیک توانست معرفی کند بعد از ۱۰۵ تکرار، به ازای مقادیر پارامترهای جدول ۳، بازده ۲۳/۱۳۸ برای سلول خورشیدی می‌باشد. پارامترهای موجود در جدول بر حسب میکرومتر می‌باشند (غیر از CR که بدون واحد می‌باشد).



شکل ۶. نمودار عملکرد الگوریتم ژنتیک بر حسب بازده سلول.

نمودار نتایج الگوریتم در ۲۴۰ تکرار در نمودار شکل ۶ نمایش داده شده است، که در هر تکرار ۵۰ بار تابع هدف فراخوانی شده است. NFE تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف می‌باشد. الگوریتم ژنتیک توانست بعد از ۱۰۵ تکرار بازده ۲۳/۱۳۸ را به دست آورد.

نتایج حاصل از ترکیب دو الگوریتم در نمودار شکل ۷ نمایش داده شده و پارامترهای بدست آمده برای بهترین پاسخ در جدول ۴ قرار داده شده است.



شکل ۷. نمودار عملکرد حاصل از ترکیب دو الگوریتم برحسب بازده سلول.

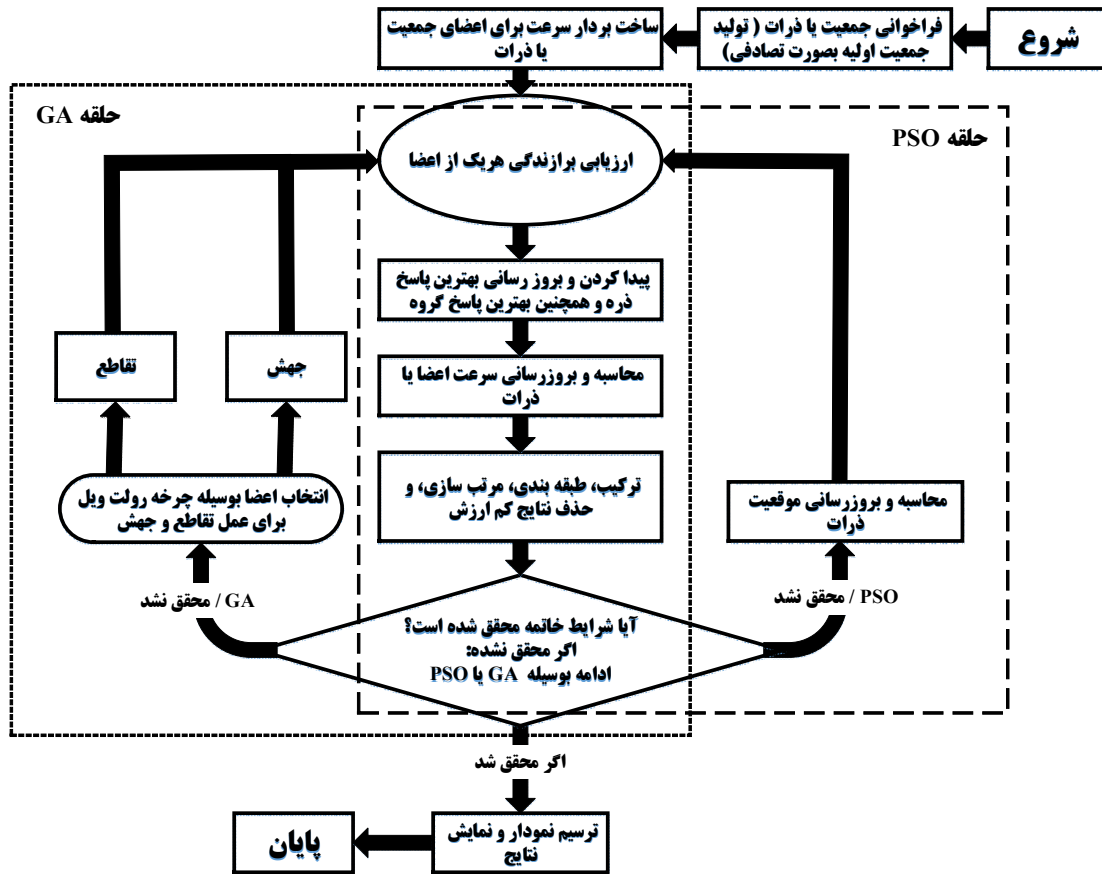
روند جستجو برای افزایش بازده سلول توسط الگوریتم ترکیبی در ۲۴۰ تکرار که در هر تکرار ۵۰ بار تابع هدف فراخوانی می‌شود، در نمودار شکل ۷ نمایش داده شده است. NFE تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف می‌باشد.

جدول ۴. پارامترهای به دست آمده از الگوریتم ترکیبی در بازده ۲۳/۲۹۳ درصد.

Parameter	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8
Value	0.049	0.03	0.017	0.03	0.07	0.059	0.07	0.04
Parameter	h_9	h_{10}	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Value	0.028	0.012	0.52	0.52	0.44	0.36	0.235	0.235
Parameter	L_7	L_8	L_9	L_{10}	Λ	CR	t_s	
Value	0.2	0.08	0.08	0.08	0.724	0.256	0.05	

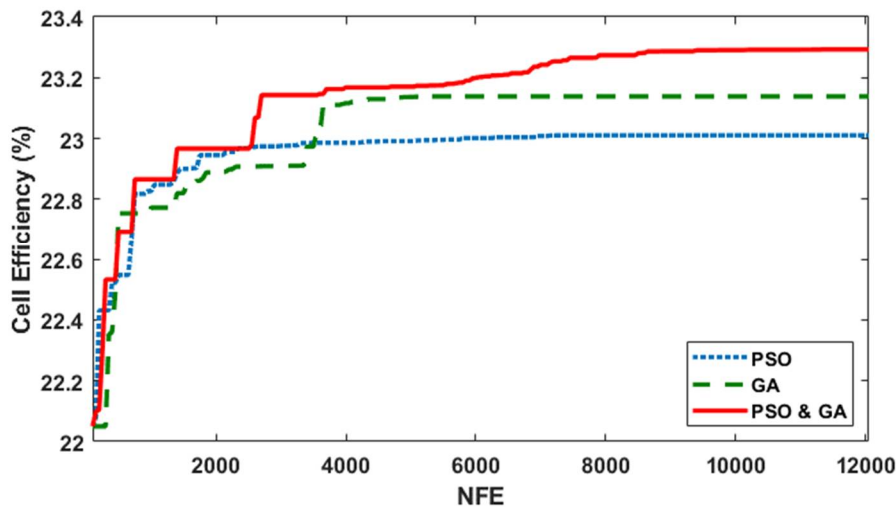
در اجرای الگوریتم ترکیبی ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد و بردارهای سرعت هر عضو از جمعیت رسم می‌شود. برای هر عضو جمعیت تابع هدف فراخوانی شده و ارزش گذاری می‌شود. سپس بهترین خاطره شخصی هر عضو و بهترین خاطره کل گروه ثبت می‌شود و سرعت ذرات به روز می‌شود. اگر شرایط خاتمه فراهم باشد نتایج نشان داده شده و اجرای الگوریتم پایان می‌پذیرد و در غیر این صورت با توجه به شرایط، روند مربوط به الگوریتم PSO یا ژنتیک اجرا می‌شود. شکل ۸ مراحل الگوریتم ترکیبی را نمایش داده است [۳۷، ۳۸].

در اجرای الگوریتم ترکیبی بهترین بازده در تکرار ۷۶ برابر ۲۳/۲۹۳ به دست آمده است. در جدول ۴ مقادیر پارامترهای به دست آمده برای بازده ۲۳/۲۹۳ قرار داده شده است.



شکل ۸. مراحل الگوریتم ترکیبی از لحظه اجرا تا پایان، در سمت راست حلقه مربوط به الگوریتم PSO و در سمت چپ حلقه مربوط به الگوریتم ژنتیک، هر کدام توسط کادر خط چین نمایش داده شده است.

در الگوریتم ترکیبی تکرار حلقه‌های مربوط به هر الگوریتم جداگانه کنترل شده است. در تست الگوریتم بهترین جواب برای حالتی ایجاد شد که در هر تکرار یک بار الگوریتم PSO و دو بار الگوریتم ژنتیک اجرا شده است. مقادیر ضرایب الگوریتم‌ها نیز مطابق شرایط مطلوب در آن‌ها در حالت اجرای جداگانه در نظر گرفته شد.

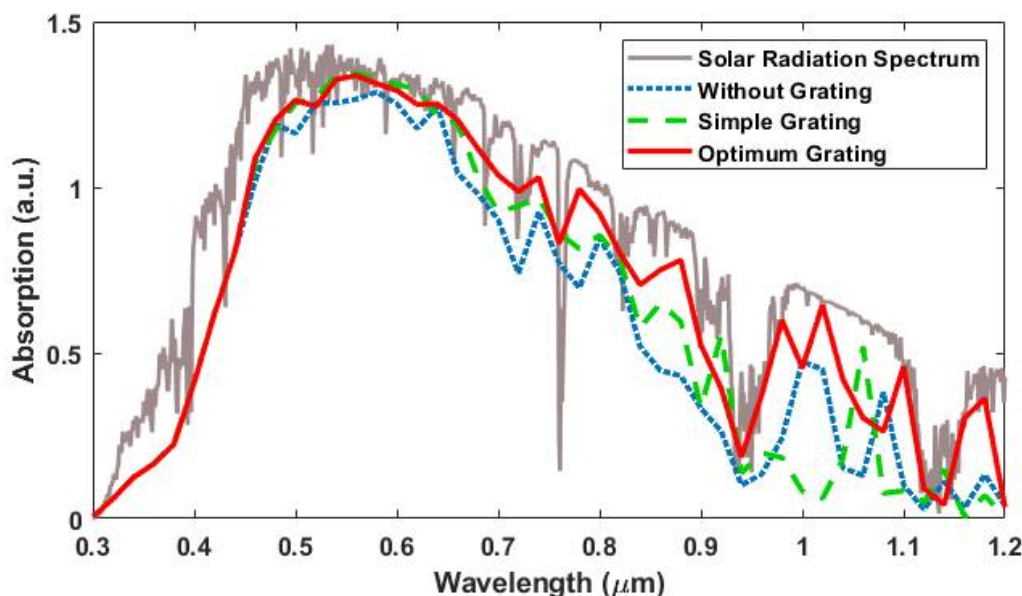


شکل ۹. مقایسه نمودارهای عملکرد الگوریتم‌ها، نقطه چین نمودار عملکرد الگوریتم PSO، خط چین نمودار عملکرد الگوریتم ژنتیک و خط پیوسته نمودار عملکرد ترکیب الگوریتم‌ها می‌باشد.

با مقایسه نمودارهای مربوط به عملکرد سه الگوریتم در شکل ۹، مشاهده می‌شود که به‌طور کلی ترکیب دو الگوریتم نسبت به حالت‌های تک، عملکرد بهتری هم در سرعت رسیدن به پاسخ بهینه و هم عبور از نقاط بهینه محلی داشته است.

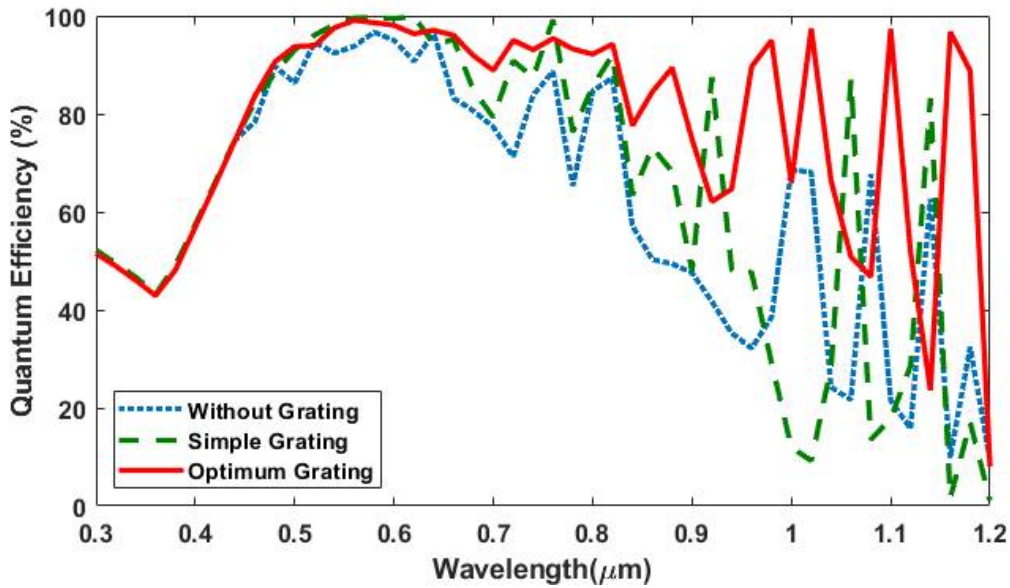
۶- نتایج شبیه‌سازی سلول خورشیدی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی برای بهینه‌ترین سلول به دست آمده نمایش داده شده است. در شکل ۱۰ طیف جذب شده برای ساختارهای سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکونی در حالت‌های بدون توری با توری ساده شکل ۱ و با توری بهینه شده نمایش داده شده است.



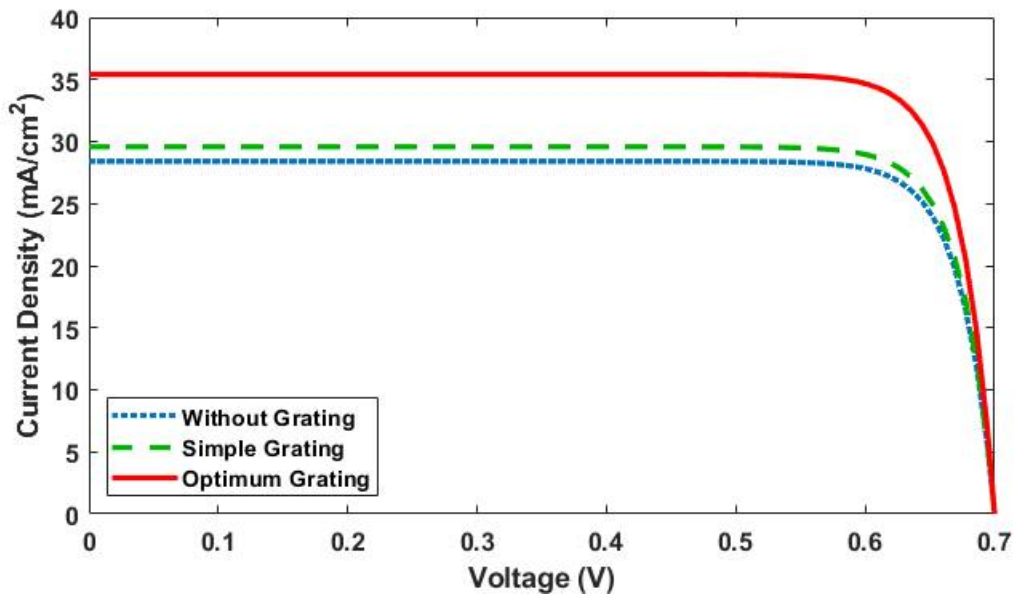
شکل ۱۰. نمودار طیف جذب سلول خورشیدی سیلیکونی لایه نازک.

در نمودار شکل ۱۰ نمودار خاکستری رنگ طیف طول موجی نور خورشید، نمودار نقطه چین آبی رنگ، طیف جذب شده توسط سلول بدون ساختار توری پراش، نمودار خط چین سبز، طیف جذب شده توسط سلول با ساختار ساده توری پراش در شکل ۱ و نمودار خط پیوسته قرمز رنگ طیف جذب شده توسط سلول با توری پراش بهینه شده می‌باشد. مقایسه این نمودارها تاکید می‌کند که جذب برای سلول برای طول موج‌های بالاتر از ۷۰۰ نانومتر که سلول‌های سیلیکونی در جذب آن طیف ضعیف عمل می‌کنند افزایش داشته است.



شکل ۱۱. بازده کوانتومی سلول خورشیدی سیلیکونی لایه نازک.

در نمودار بازده کوانتومی شکل ۱۱ نمودار نقطه‌چین در حالت بدون توری، نمودار خط‌چین برای توری ساده، نمودار خط پیوسته برای توری بهینه می‌باشد.



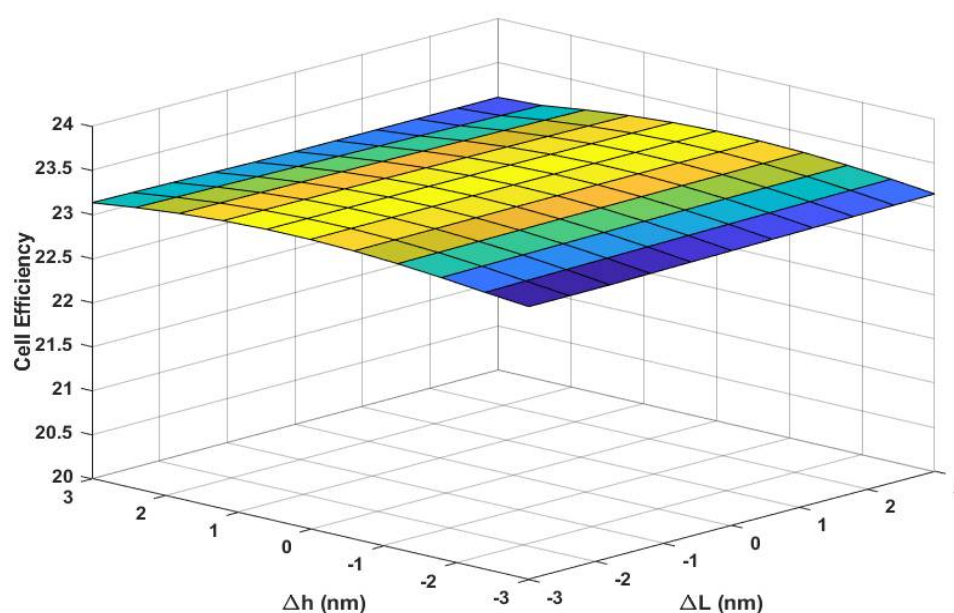
شکل ۱۲. نمودار چگالی جریان برای سه حالت توری پرآش برای سلول سیلیکونی لایه نازک.

در شکل ۱۲ نمودار نقطه‌چین چگالی جریان سلول بدون توری پرآش، نمودار خط‌چین چگالی جریان سلول با توری ساده و نمودار خط پیوسته چگالی جریان سلول با توری بهینه شده می‌باشد.

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی برای سلول بدون توری، با توری ساده و توری معرفی شده برای سه پاسخ بهینه‌سازی.

Simulation	Without grating	Simple Grating	PSO	GA	PSO&GA
Efficiency (%)	18.688	19.458	23.01	23.138	23.293
Current Density (mA/cm ²)	28.411	29.582	34.982	35.177	35.412

در جدول ۵ مقادیر بازده و چگالی جریان سلول برای شبیه‌سازی‌های انجام شده در حالت‌های بدون توری پراش، با توری پراش ساده و نتایج بهینه‌سازی توری معرفی شده برای سه الگوریتم نمایش داده شده است.



شکل ۱۳. بررسی خطاهای ساخت توری پراش در سلول با ساختار بهینه شده.

شکل ۱۳ مقادیر تغییرات بازده سلول ناشی از خطاهای ساخت توری پراش برای کاهش و افزایش ۳ نانومتری در ارتفاع و عرض لایه‌های توری پراش را نمایش داده است. در این نمودار ΔL تغییرات اعمال شده برای عرض لایه‌های توری پراش و ΔH تغییرات برای ارتفاع هر بخش از توری پراش بهینه شده می‌باشد.

۷- جمع بندی

در این مقاله طراحی سلول سیلیکونی با بازتابنده پراش چندبخشی انجام شده است. برای جستجو بین پارامترهای بسیار زیاد مسئله که عملاً یک مسئله با بی‌نهایت جواب را ایجاد کرده بود، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده شده است. مدل اولیه‌ای از ساختار سلول مبتنی بر یک پاسخ تصادفی طراحی شد. سپس این مدل اولیه به دو الگوریتم بهینه‌سازی ذرات و ژنتیک داده شد. با توجه به ویژگی‌های مثبت و منفی دو الگوریتم برای تولید پاسخ بهتر از ترکیب آنها استفاده شد، در این ترکیب، الگوریتم‌ها با پوشاندن نقاط ضعف یکدیگر در این مسئله بهینه مطلوبی را ایجاد کردند. به‌طور کلی مجموعه این روندها در این مقاله توانسته

است ساختار پراش نور در سلول را به نحوی مدیریت کند که بیشترین حبس‌شدگی و متناسب با آن بیشترین میزان جذب برای سلول فراهم شود، که بازده سلول به میزان ۳,۸ درصد نسبت به حالت توری ساده افزایش یافته است

مراجع

- [1] P. Frankl, S. Nowak, M. Gutschner, S. Gnos, and T. Rinke, "Technology roadmap: solar photovoltaic energy," International Energy Association, 2010.
- [2] S. Fonash, Introduction to light trapping in solar cell and photo-detector devices. Elsevier, 2014.
- [3] M. A. Green, Silicon solar cells: advanced principles & practice. Centre for photovoltaic devices and systems, University of New South Wales, 1995.
- [4] Y. Wang et al., "Diffraction-Grated Perovskite Induced Highly Efficient Solar Cells through Nanophotonic Light Trapping," Advanced Energy Materials, vol. 8, no. 12, p. 1702960, 2018.
- [5] N.-N. Feng et al., "Design of highly efficient light-trapping structures for thin-film crystalline silicon solar cells," IEEE transactions on electron devices, vol. 54, no. 8, pp. 1926-1933, 2007.
- [6] F. Li et al., "Machine Learning (ML)-Assisted Design and Fabrication for Solar Cells," Energy & Environmental Materials, vol. 2, no. 4, pp. 280-291, 2019.
- [7] H. Bae et al., "Optimization of silicon solar cell fabrication based on neural network and genetic programming modeling," Soft Computing, vol. 14, no. 2, pp. 161-169, 2010.
- [8] P. Vincent et al., "Application of Genetic Algorithm for More Efficient Multi-Layer Thickness Optimization in Solar Cells," Energies, vol. 13, no. 7, p. 1726, 2020.
- [9] C. Heine and R. H. Morf, "Submicrometer gratings for solar energy applications," Applied Optics, vol. 34, no. 14, pp. 2476-2482, 1995.
- [10] L. Zeng et al., "Efficiency enhancement in Si solar cells by textured photonic crystal back reflector," Applied Physics Letters, vol. 89, no. 11, p. 111111, 2006.
- [11] L. Zeng et al., "Demonstration of enhanced absorption in thin film Si solar cells with textured photonic crystal back reflector," Applied Physics Letters, vol. 93, no. 22, p. 221105, 2008.
- [12] J. Gjessing, E. S. Marstein, and A. Sudbø, "2D back-side diffraction grating for improved light trapping in thin silicon solar cells," Optics express, vol. 18, no. 6, pp. 5481-5495, 2010.
- [13] K. X. Wang, Z. Yu, V. Liu, Y. Cui, and S. Fan, "Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings," Nano letters, vol. 12, no. 3, pp. 1616-1619, 2012.
- [14] F. Qin, H. Zhang, C. Wang, J. Zhang, and C. Guo, "Double AAO nanogratings for broad spectrum absorption enhancement in thin film Si solar cells," Optics & Laser Technology, vol. 75, pp. 93-98, 2015.
- [15] A. Tavanbakhsh, A. Bahrami, M. Dehdast, and S. Amirkhan, "A Novel Optimized Multilayer Back Reflector for Solar Applications," Chinese Journal of Physics, 2015.
- [16] M. Dehdast, A. Bahrami, and S. Mohammadnejad, "A novel trapezoidal profile of optimized diffraction grating for light trapping in thin silicon solar cells," Optica Applicata, vol. 47, no. 1, 2017.
- [17] D. B. Fogel, "What is evolutionary computation?," IEEE Spectrum, vol. 37, no. 2, pp. 26-32, 2000.
- [18] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in Encyclopedia of machine learning: Springer, pp. 760-766, 2011.
- [19] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, "Particle swarm optimization," Swarm intelligence, vol. 1, no. 1, pp. 33-57, 2007.
- [20] R. L. Haupt, S. E. Haupt, and S. E. Haupt, Practical genetic algorithms. Wiley New York, 1998.
- [21] L. Y. Tseng and S. B. Yang, "Genetic algorithms for clustering, feature selection and classification," in Neural Networks, 1997., International Conference on, vol. 3, pp. 1612-1616: IEEE, 1997.
- [22] R. Fletcher, Practical methods of optimization. John Wiley & Sons, 2013.
- [23] A. E. Eiben, P. E. Raue, and Z. Ruttkay, "Genetic algorithms with multi-parent recombination," in International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, pp. 78-87: Springer, 1994.
- [24] S. J. Gould, The structure of evolutionary theory. Harvard University Press, 2002.

- [25] T. Back, *Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms*. Oxford university press, 1996.
- [26] A. Lipowski and D. Lipowska, "Roulette-wheel selection via stochastic acceptance," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 391, no. 6, pp. 2193-2196, 2012.
- [27] C. C. Da Ronco and E. Benini, "A Simplex-Crossover-Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm," in *IAENG Transactions on Engineering Technologies: Springer*, pp. 583-598, 2014.
- [28] C. R. Houck, J. Joines, and M. G. Kay, "A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation," *Ncsu-ie tr*, vol. 95, no. 09, pp. 1-10, 1995.
- [29] A. Bahrami, S. Mohammadnejad, and S. Soleimaninezhad, "Photovoltaic cells technology: principles and recent developments," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 45, no. 2, pp. 161-197, 2013.
- [30] A. Thelen, *Design of optical interference coatings*. McGraw-Hill Companies, 1989.
- [31] R. J. Moerland and J. P. Hoogenboom, "Subnanometer-accuracy optical distance ruler based on fluorescence quenching by transparent conductors," *Optica*, vol. 3, no. 2, pp. 112-117, 2016.
- [32] K. Deng, Z. Liu, M. Wang, and L. Li, "Nanoimprinted grating-embedded perovskite solar cells with improved light management," *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 19, p. 1900830, 2019.
- [33] Y. Zhang et al., "Theoretical analysis of improved efficiency of silicon-wafer solar cells with textured nanotriangular grating structure," *Optics Communications*, vol. 410, pp. 369-375, 2018.
- [34] I. Malitson, "Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica," *Josa*, vol. 55, no. 10, pp. 1205-1209, 1965.
- [35] L. Long, Y. Yang, and L. Wang, "Simultaneously enhanced solar absorption and radiative cooling with thin silica micro-grating coatings for silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 197, pp. 19-24, 2019.
- [36] D. Hiller, P. Hönicke, and D. König, "Material combination of Tunnel-SiO₂ with a (sub-) Monolayer of ALD-AlO_x on silicon offering a highly passivating hole selective contact," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 215, p. 110654, 2020.
- [37] M. Ghosh, R. Guha, I. Alam, P. Lohariwal, D. Jalan, and R. Sarkar, "Binary genetic swarm optimization: A combination of GA and PSO for feature selection," *Journal of Intelligent Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 1598-1610, 2020.
- [38] F. Moslehi, A. Haeri, and F. Martínez-Álvarez, "A novel hybrid GA-PSO framework for mining quantitative association rules," *soft computing*, vol. 24, no. 6, pp. 4645-4666, 2020.