

## Increased Light Absorption in CIGS Solar Cells with Plasmonic Ag Nanostructures to Increase Efficiency

Sayyed Mohammad Sadegh Hashemi Nassab, *PhD student*, Mohsen Imanieh, *Assistant Professor*, Abbas Kamali, *Assistant Professor*, Sayyed Ali Emamghorashi, *Assistant Professor*, Saeid Hassanhosseini, *Assistant Professor*

Department of Electrical Engineering- Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran  
sa\_hashemi3@yahoo.com, imaniehm@iaufasa.ac.ir, abbas\_kamaly@yahoo.com, aemamghorashi@iaufasa.ac.ir, s.hosseini@iaufasa.ac.ir

### Abstract

Recently, environmental problems on a global scale has been increased seriously. To overcome these problems, Solar cells is important as an energy source and free from contamination. Due to the increasing use of renewables, the use of solar cells for obtaining energy is growing. The cells convert directly sunlight into electricity by the photovoltaic. Photovoltaic energy research and development is generally done in two areas: cost reduction and increasing efficiency. The efficiency of thin film solar cells can be increased considerably by coupling the solar cells with plasmonic nanoparticles (NPs). this study investigates, through meticulous simulations, the effects of plasmonic nanoparticle shapes and size on the improvement of the energy conversion efficiency of Copper indium gallium selenium (CIGS) solar cells. Two different shapes including spheres and cylinders were analyzed in this study. It was revealed that the cylindrical Ag nanoparticles, of diameter 50 nm, height 125 nm place on an array with period 215 nm exhibited the most substantial enhancement in the optical absorption and electrical current generation. The conclusion attained in this paper has been made through optical and electrical analysis as well as near field imaging studies.

**Keywords:** plasmonics, CIGS solar cells, Ag nanoparticles, nanoparticle shapes, FDTD

**Received:** 25 September 2020

**Revised:** 8 November 2020

**Accepted:** 30 November 2020

**Corresponding Author:** Dr. Mohsen Imanieh

## افزایش جذب نور در سلول‌های خورشیدی CIGS با نانو ساختارهای پلاسمونیکي نقره جهت افزایش راندمان

سید محمد صادق هاشمی نسب، دانشجوی دکترا، محسن ایمانیه، استادیار، عباس کمالی، استادیار، سیدعلی امام-قرشی، استادیار، سعید حسن حسینی، استادیار

دانشکده مهندسی برق - واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران  
sa\_hashemi3@yahoo.com, imaniehm@iaufasa.ac.ir, abbas\_kamaly@yahoo.com, aemamghorashi@iaufasa.ac.ir, s.hoseini@iaufasa.ac.ir

**چکیده:** در سال‌های اخیر، مشکلات زیست‌محیطی در مقیاس جهانی به صورت جدی افزایش پیدا کرده است. برای غلبه بر این مشکلات سلول‌های خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی پاک و عاری از آلودگی، اهمیت پیدا کرده‌اند. با توجه به استفاده روزافزون از انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از سلول‌های خورشیدی جهت تأمین انرژی رو به گسترش است. این سلول‌ها، نور خورشید را به طور مستقیم توسط اثر فتوولتائیک به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. تحقیق و توسعه در مورد انرژی فتوولتائی، عموماً در دو زمینه کاهش هزینه‌ها و افزایش بازده صورت می‌گیرد. بازده سلول‌های خورشیدی لایه نازک را می‌توان با جفت کردن سلول‌های خورشیدی با نانوذرات پلاسمونیک به طور قابل توجهی افزایش داد. در این مقاله، از طریق شبیه‌سازی‌های دقیق، آثار مربوط به شکل و اندازه نانوذرات را در بهبود بازده سلول‌های خورشیدی مس-ایندیم-گالیم-سلنیوم (CIGS) مورد بررسی قرار گرفته و دو شکل متفاوت، شامل کره و استوانه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نشان داده شد که نانوذرات استوانه‌ای نقره با قطر ۵۰ نانومتر، ارتفاع ۱۲۵ نانومتر و پیروی آرایه ۲۱۵ نانومتر بیشترین افزایش را در جذب اپتیکی و تولید جریان الکتریکی ایجاد نموده‌اند. نتیجه به دست آمده در این مقاله از طریق آنالیز اپتیکی و الکتریکی و همچنین مطالعه‌ی تصویر میدان نزدیک حاصل شده است.

**کلمات کلیدی:** تفاضل محدود حوزه زمانی، پلاسمونیک، سلول خورشیدی CIGS، شکل نانوذرات، نانوذرات نقره

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۷/۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۸/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۹/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محسن ایمانیه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: فسا- شهرک دانشگاهی محمد رسول الله (ص)- دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا- دانشکده

مهندسی برق

## ۱- مقدمه

رشد مصرف جهانی انرژی در قرن‌های اخیر و همراه با آن، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، با آلودگی بیش از پیش محیط-زیست و خسارات جبران‌ناپذیر برای منابع حیاتی همراه بوده است. به‌منظور کاهش وابستگی جهانی به منابع طبیعی پایان‌پذیر و سوخت‌های مخرب محیط‌زیست، تلاش‌های علمی فراوانی برای کاهش هزینه‌های تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر صورت گرفته است [۱،۲]. از جمله، تلاش برای تولید انرژی الکتریکی با استفاده از نور خورشید، که با استفاده از خاصیت ذاتی نیمه-رساناها انجام شده است. از آنجا که مجموعه‌ی بزرگی از پدیده‌های حالت جامد، شامل تبدیل انرژی از شکلی به شکل دیگر هستند، مطالعه‌ی تبدیل انرژی در مواد، با استفاده از قطعات حالت جامد، زمینه‌ای گسترده برای پیشرفت تکنولوژی انرژی‌های تجدیدپذیر، خواهد بود [۳].

بسیاری از نیمه‌رساناها می‌توانند الکتروسیسته را از نور خورشید تولید کنند. سلول‌های فتوولتایی، که اغلب سلول‌های خورشیدی نامیده می‌شوند، از جمله قطعات حالت جامد هستند که بر اساس تبدیل انرژی خورشید به الکتروسیسته، کار می‌کنند [۴]. از مزایای این روش تبدیل انرژی این است که، مواد غیر دوستدار محیط‌زیست تولید نمی‌کند و منبع نامحدودی از انرژی در اختیار ما قرار می‌دهد [۵].

در این مقاله، هدف استفاده از ویژگی جذب پلاسمونی نانوذرات فلزی نقره (Ag) در سلول‌های خورشیدی مس-این‌دیم-گالیم-سلنیوم<sup>۱</sup> (CIGS) به‌منظور افزایش بازدهی قطعه است. مرور کارهای انجام شده در زمینه‌ی به کار گیری نانوذرات پلاسمونیک<sup>۲</sup> در سلول‌های خورشیدی فتوولتاییک، گویای آن است که مطالعات اندکی در زمینه استفاده از این نانوذرات در سلول‌های خورشیدی غیر سیلیکونی و حساس شده با رنگ دانه صورت گرفته است. به ویژه کارهای انجام شده در این حوزه بر روی سلول خورشیدی CIGS کمیاب است. جنگ<sup>۳</sup> و همکارانش سلول‌های خورشیدی چندکریستالی<sup>۴</sup> سیلیکونی و CIGS آراییده شده با نانوذرات طلا (Au) و نقره (Ag) را به روش لایه نشانی چرخشی تهیه نموده‌اند [۶]. نتایج آنها نشان داد که به کار گیری نانوذرات پلاسمونیک طلا و نقره در سلول‌های خورشیدی CIGS سبب افزایش بازدهی آنها به ترتیب به میزان ۱/۲ و ۱/۴ درصد گردید. چن<sup>۵</sup> و همکاران نشان دادند که استفاده از نانوذرات پلاسمونیک طلا در فصل مشترک اتصال CIGS/CdS, pn بازدهی سلول را از ۸/۳۱ به ۱۰/۳۶ درصد افزایش داد [۷]. به تازگی رویانیا و همکاران تأثیر به کارگیری همزمان درجه‌بندی گاف نواری<sup>۶</sup> و استفاده از نانوذرات پلاسمونیک طلا را بر کارکرد سلول خورشیدی بسیار نازک CIGS گزارش نموده‌اند [۸]. نتایج آنها بهبود قابل توجهی را برای سلول‌های بسیار نازک CIGS نشان داد. مرور بیشتر کارهای صورت گرفته نشان می‌دهد که تحقیقات جامعی بر روی تأثیر شکل و ابعاد نانوذرات پلاسمونیک و همچنین پیوند آرایه نانوذرات بر روی پارامترهای خروجی سلول‌های خورشیدی CIGS صورت پذیرفته است. بنابراین در این مقاله، با انجام شبیه‌سازی‌های دقیق، پارامترهایی مانند شکل نانوذرات، ابعاد و پیوند آرایه نانوذرات برای رسیدن به بهترین عملکرد سلول خورشیدی CIGS بررسی گردیده و بهینه‌سازی می‌شوند. محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌ها با کمک روش قدرتمند تفاضل محدود حوزه زمانی<sup>۷</sup> (FDTD) انجام خواهد شد. طلا و نقره به دلیل تشدید پلاسمون‌های سطحی‌شان که در ناحیه مرئی قرار دارد و آنها را قادر به برهمکنش قوی با قله طیف تابش خورشید می‌کند مواد محبوبی به این منظور هستند. در این مطالعه از نقره استفاده شده است. به خاطر آنکه مقرون به‌صرفه‌تر است و در مقابل اکسید شدن در هوا پایداری بالایی دارد.

## ۲- طیف خورشید و فوتون‌ها

مشاهده‌ی رنگ‌های طیف، نشان می‌دهد که نور خورشید می‌تواند به رنگ‌های مختلفی تجزیه شود. همچنین، استفاده از خطوط موازی بسیار نزدیک، به عنوان توری پراش، نشان می‌دهد که رنگ‌ها می‌توانند با فاصله خطوط مرتبط باشند. به این معنی که طول موجی مربوط به هر رنگ وجود دارد. از این‌رو، نور یک موج الکترومغناطیسی است و می‌توان یک طول موج به آن نسبت داد. از سوی دیگر، با مشاهده‌ی پدیده‌هایی چون اثر فتوالکتریک، به این نتیجه می‌رسیم که نور به‌صورت بسته‌های کوچک انرژی حرکت می‌کند، که مانند ذره رفتار می‌کنند و فوتون نامیده می‌شوند. انرژی فوتون با طول موج آن به‌صورت زیر در ارتباط است:

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

در این رابطه  $h$  ثابت پلانک و  $c$  سرعت نور است. تنها فوتون‌هایی می‌توانند در فرآیند تبدیل انرژی شرکت کنند که انرژی بالاتر از شکاف باند انرژی ماده نیمه رسانای سلول داشته باشند. انرژی تابشی خورشید در خارج از جو زمین با شدت  $1353$  وات بر مترمربع به اجرام می‌رسد و طیف نوری آن تحت عنوان توده هوا<sup>۱</sup> صفر نامیده می‌شود. پس از ورود این پرتو به داخل اتمسفر زمین، بخش فرسوخ آن توسط بخار آب موجود در جو زمین جذب شده و بخش فرا بنفش آن توسط جذب در لایه‌ی اوزن و پراکنش توسط ذرات معلق موجود در هوا تضعیف می‌شود. توده هوا، معیاری از چگونگی تأثیر جذب در اتمسفر بر روی طیف و شدت تابش نوری است که به سطح زمین می‌رسد. همچنین توده هوا نشان دهنده‌ی محل قرارگیری خورشید و زاویه‌ی تابش آن است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2)$$

در این رابطه،  $\theta$  زاویه‌ی فرودی نور خورشید است. این رابطه نشان می‌دهد که، عدد توده هوا همیشه بزرگ‌تر یا مساوی یک است. توده هوا  $1/5$  به این معنی است که خورشید در محلی قرار گرفته که طول مسیر آن برای تابش روی سطح سلول  $1/5$  برابر حالت عمودی است. این حالت، معادل زاویه‌ی فرودی حدود  $48^\circ$  درجه نور تابشی در سطح زمین است. پرکاربردترین استاندارد که برای مقایسه‌ی عملکرد سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، طیف  $AM1/5$  است. خلاصه‌ای از استانداردهای توزیع طیف انرژی خورشید در جدول (۱) نشان داده شده است [۹]. در شکل (۱) طیف خورشیدی نشان داده شده است. سلول‌های خورشیدی پایه سیلیکونی توانایی جذب تا طول موج  $1/1$  میکرومتری از طیف تابشی خورشید را دارا هستند.

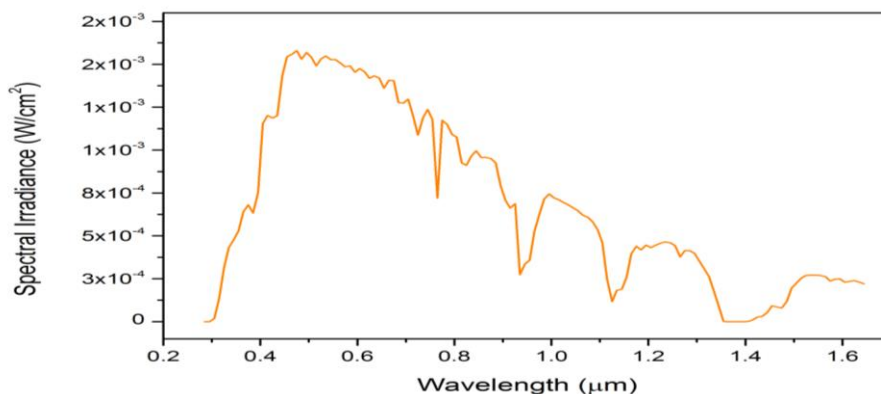
### ۳- سلول‌های خورشیدی پلاسماونیک

پلاسماونیک علمی است که به مطالعه برهم کنش نور با ساختارهای فلزی می‌پردازد. این برهم کنش بین نور و فلز باعث ایجاد نوسان‌های گروهی الکترون‌های نوار ظرفیت فلز می‌شود. انتقال داده در پلاسماونیک با حرکت نوسانی هسته‌ی مثبت رخ می‌دهد.

Table (1): Specifications of solar energy spectrum distribution

جدول (۱): مشخصات توزیع طیف‌های انرژی خورشیدی

ارتفاع	موقعیت خورشید	توان خورشیدی تابشی ( $W/m^2$ )	توزیع طیفی
بیرون اتمسفر	-----	۱۳۵۳	AM۰
روی سطح	$\theta = 90^\circ$	۱۰۴۰	AM۱
روی سطح	$\theta = 48^\circ$	۱۰۰۰	AM۱/۵
روی سطح	$\theta = 60^\circ$	۶۹۱	AM۲



شکل (۱): نمودار طیف خورشید

Figure (1): Sun spectrum diagram

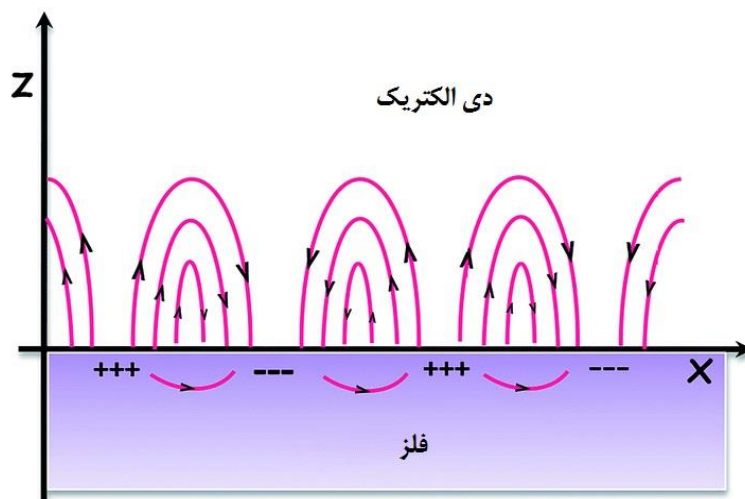
قرار دادن نانوذرات پلاسماونیک در پشت سلول می‌تواند موجب جلوگیری از تداخل نور و افزایش قابل توجه بازدهی شود. استفاده از پلاسماونیک به این علت است که طول موج بلند نور (چند میکرومتر) مانع از توسعه الکترونیک نوری در مقیاس نانو می‌شود. یک راه ممکن برای غلبه بر این محدودیت تبدیل کردن نور به پلاسما است. پلاسما طول موج بسیار کوتاه‌تری نسبت به نور دارد و می‌تواند مانند یک سیگنال الکترونیکی منتشر شود. طول موج الکترون-های منتشر شده پلاسما در حد چند نانومتر است. چالش اصلی در استفاده از پلاسماون‌های سطحی<sup>۹</sup>، جفت‌شدگی نور به پلاسماون‌های سطحی و ایجاد آنها در فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک است.

نانوذرات فلزی با تبدیل نور ورودی به میدان پلاسماونی می‌توانند در طیف موج‌های خاصی، نور ورودی را تقویت نموده و باعث افزایش جذب در سلول شوند. همچنین باعث پراکنش بیشتر نور به داخل ساختار شده و منجر به جذب نور ورودی شود. وقتی نور به سطح فلز تابیده می‌شود اگر بسامد نور با بسامد پلاسماوی فلز یکسان باشد الکترون‌های نوار رسانش فلز شروع به نوسان می‌کنند که به نوسان آنها پلاسماون سطحی می‌گویند. پلاسماون‌های سطحی را می‌توان توسط یک صفحه یا فصل مشترک بین مواد با ثابت دی‌الکتریک مختلف برانگیخته کرد. این امواج در محدوده نزدیک به سطح باقی مانده و دارای یک مؤلفه میدان الکتریکی هستند که با افزایش فاصله از سطح مشترک، مطابق آنچه که در شکل (۲) نشان داده شده است در جهت  $\pm Z$  کاهش می‌یابد.

شرط ایجاد یک مد پلاسماوی سطحی به صورت زیر است:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{-\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (3)$$

که در آن  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  ثابت‌های دی‌الکتریک و  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  ضرایب جذب محیط ۱ و محیط ۲ هستند. اگر ثابت دی‌الکتریک محیط ۱ مثبت باشد، محیط ۲ باید یک بلور با ثابت دی‌الکتریک منفی، مانند فلزات باشد. بنابراین در فصل مشترک یک فلز و خلأ امواج پلاسماوی سطحی به وجود می‌آیند. اگر نور به نانوذرات فلزی بتابد به علت محدود بودن سطح و حجم نانوذره‌ها، پلاسماون‌ها در سطح نانوذرات ایجاد شده و میدان الکترومغناطیسی قوی در اطراف نانوذرات تشکیل می‌شود و پلاسماون سطحی جایگزیده<sup>۱۰</sup> شکل می‌گیرد [۱۰]. تشدید پلاسماون سطحی جایگزیده شده باعث افزایش میدان مغناطیسی موضعی می‌شود که خواص نوری دستگاه‌های نانو ساختار را بهبود می‌بخشد. در مقایسه با سلول‌های خورشیدی رایج، سلول‌های خورشیدی لایه نازک دارای لایه جاذب نیمه‌رسانا با گاف نواری باریک‌تر هستند. اما این امر می‌تواند منجر به جذب ناکارآمد و پایین قطعه شود [۱۱].



شکل (۲): برانگیزش یک موج پلاسماوی سطحی در فصل مشترک بین یک فلز با ثابت دی‌الکتریک  $\epsilon_2$  و یک جسم دی‌الکتریک یا خلأ با ثابت دی‌الکتریک  $\epsilon_1$

Figure (2): Excitation of a surface plasma wave at the interface between a metal with a dielectric constant  $\epsilon_2$  and a dielectric body or a vacuum with a dielectric constant  $\epsilon_1$

بنابراین، طراحی بهتر ساختار قطعه برای گیراندازی بالا و افزایش جریان فوتونی حیاتی است. در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای افزایش جذب نور و بازده سلول‌های خورشیدی انجام شده است. استفاده از نانوساختارهای پلاسمونیک در لایه بالایی سلول خورشیدی از راه‌های مؤثر کاهش اتلاف بازتابی است [۱۲].

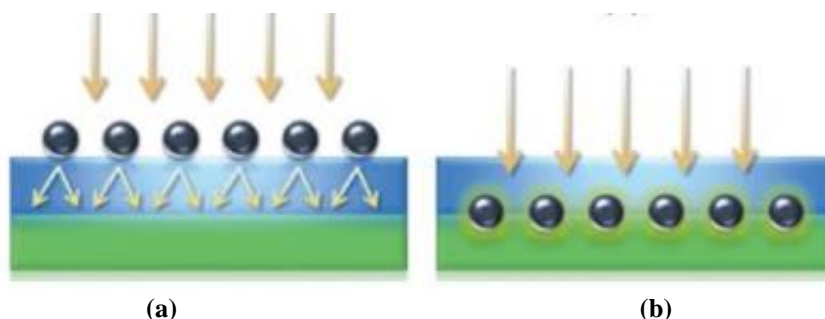
یکی از ساختارهایی که می‌توان بررسی کرد به این صورت است که یک موج الکترومغناطیسی، از یک سمت به ذرات آرایه تابیده می‌شود [شکل (۳-a)]. وقتی موج به اولین ذره می‌رسد، باعث نوسان الکترون‌های رسانش این ذره می‌شود. این الکترون‌های نوسانی، دوباره شروع به تابش موج الکترومغناطیسی می‌کنند که منجر به پراکندگی تابش توسط این ذره می‌شود. حضور نانوذرات پلاسمونیک درون لایه فعال سلول‌های خورشیدی، جذب اپتیکی و در نتیجه بازده را بهبود می‌بخشد. حضور نانوذره موجب می‌شود نور فرودی جفت‌شدگی بهتری با لایه فعال داشته باشد و در نتیجه انعکاس از سطح کاهش یابد [شکل (۳-b)] [۱۳].

به تله انداختن نور برای افزایش ضریب جذب بسیار مهم است. یکی از پیشنهادها در این زمینه، استفاده از نانوساختارهای فلزی است که می‌تواند نور را به دام انداخته و سبب بالا رفتن بازده سلول شود [۱۴]. قرار دادن نانوذره در فصل مشترک بین فلز و دی‌الکتریک سبب می‌شود که نور به سمت ناحیه جاذب پراکنده شود و در نتیجه مسیر بیشتری را در داخل آن بپیماید. تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده سبب افزایش میدان مغناطیسی موضعی می‌شود که خواص نوری دستگاه‌های نانوساختار را بهبود می‌بخشد [۱۳]. استفاده از نانوساختارها در لایه بالایی سلول خورشیدی از راه‌های مؤثر کاهش اتلاف بازتابی است [۱۲، ۱۵]. تنها نوری که در لایه‌ی جذب سلول خورشیدی، جذب می‌شود می‌تواند به جریان الکتریکی تبدیل شود. بنابراین مواد دیگر استفاده شده در سلول خورشیدی می‌توانند نور را جذب کنند ولی نور جذب شده به جریان الکتریکی تبدیل نمی‌شود [۱۶].

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

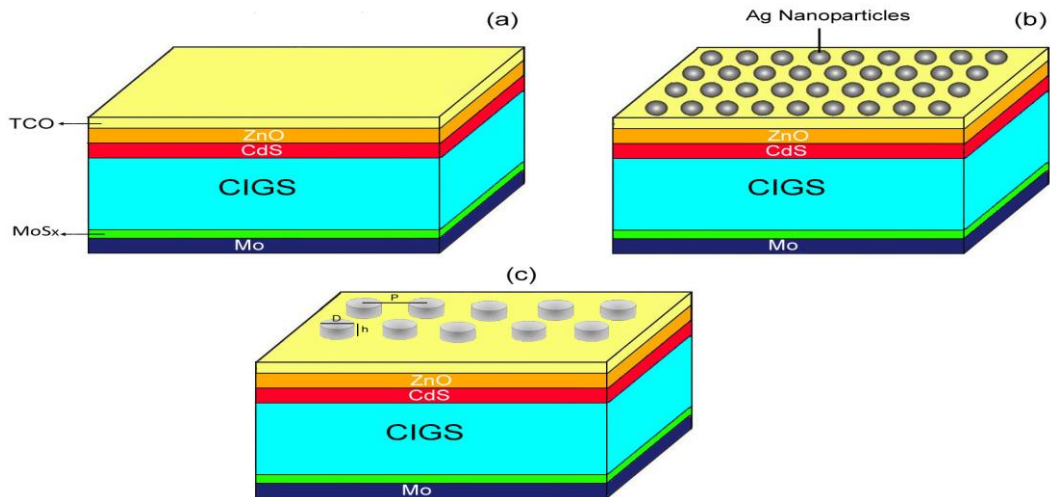
در این مقاله، از یک سلول خورشیدی ساده استفاده کرده و به آن نانوذرات نقره در حالت کروی و استوانه‌ای طبق شکل (۴) اعمال کرده‌ایم. برای شبیه‌سازی، ماژول‌های FDTD و DEVICE نرم‌افزار لومریکال<sup>۱۱</sup> برای بدست آوردن ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی ساختارهای مدل‌سازی شده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۷]. برای بالا بردن دقت، سطح نانوذرات نقره با قطعه‌های مش ۱ در ۱ نانومتر مش‌بندی شده است. برای حفظ تناوب یکنواخت نانوذرات، شرایط مرزی دوره‌ای در مرزهای جانبی بکار برده شده است.

شرایط مرزی لایه کاملاً سازگار نیز در جهت تابش فرودی استفاده شده تا از هر گونه اثر تداخلی جلوگیری شود. از ضریب شکست مختلط برای بیان ویژگی‌های اپتیکی مواد مختلف در FDTD استفاده شده است. ضرایب شکست از کتاب مرجع پالیک<sup>۱۲</sup> اقتباس گردیده است [۱۸].



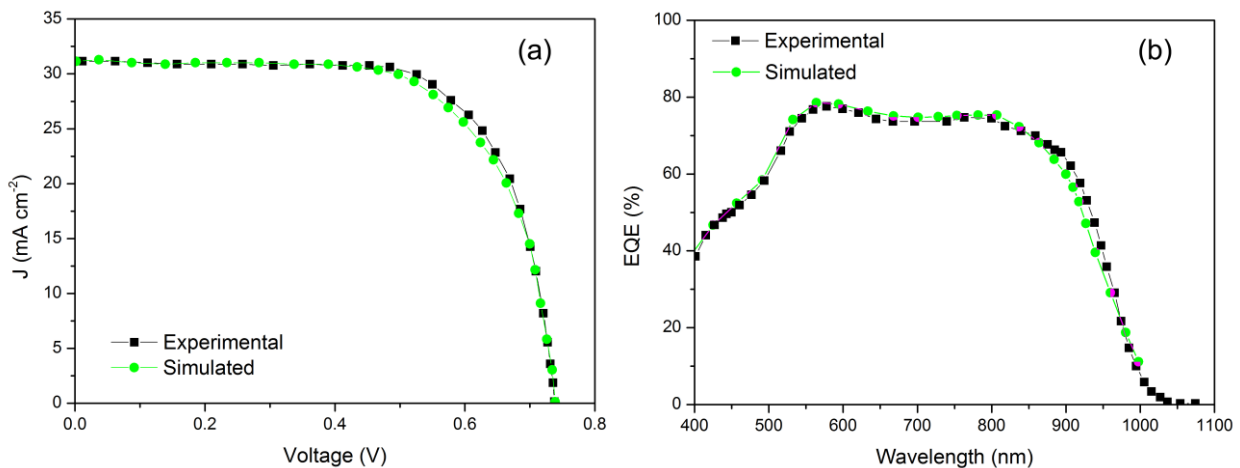
شکل (۳): (a) به دام افتادن نور توسط نانوذرات فلزی و پخش با زوایای مختلف و افزایش عمق مؤثر، (b) قرار گرفتن نانوذرات فلزی درون نیمه‌هادی و برانگیخته شدن میدان نزدیک ذره و تولید زوج الکترون-حفره

Figure (3): (a) Trapping of light by metal nanoparticles and diffusion at different angles and increasing the effective depth, (b) Placement of metal nanoparticles inside the semiconductor and excitation of the field near the particle and production of electron-hole pair



شکل (۴): شماتیک سلول خورشیدی CIGS (a) بدون نانوذرات (سلول لخت) (b) با نانوذرات کروی (c) با نانوذرات استوانه‌ای  
Figure (4): Schematic of the modelled CIGS solar cell: (a) without NPs or bare cell and with (b) spherical (c) cylindrical Ag NPs

شبیه‌سازی با استفاده از پارامترهای فیزیکی مواد موجود در کتابخانه لومریکال انجام شده است. سلول شبیه‌سازی تحت تابش طیف AM1/5 قرار گرفته است. نتایج مربوط به توان جذب شده و آهنگ تولید سپس در یک شبیه‌سازی الکتریکی که معادلات پواسن و رانتس - پخش را در ماژول DIVICE حل می‌کند مورد استفاده قرار گرفته شده است. ترکیب شبیه‌سازی-های اپتیکی و الکتریکی برای محاسبه بازده تبدیل توان سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است. در گام نخست، فرآیند شبیه‌سازی راستی آزمایی (اعتبارسنجی) شد. برای این کار نتایج مربوط به نمودار  $j-v$  و بازدهی کوانتومی خارجی<sup>۱۳</sup> (EQE) اندازه‌گیری شده یک سلول ساخته شده تجربی [۱۹] شبیه‌سازی شد و سلول مدل‌سازی شده به عنوان سلول مرجع [شکل (۴-ا)] برای انجام تغییرات بعدی و بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. منحنی‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده،  $j-v$ ، بازده کوانتومی در شکل‌های [شکل (۵-ا) و (۵-ب)] نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که از شکل مشخص است، منحنی‌های شبیه‌سازی شده در سازگاری بسیار خوبی با نتایج تجربی قرار دارند. این امر اعتبار و دقت فرآیند شبیه‌سازی را تأیید می‌کند.



شکل (۵): (a) منحنی‌های J-V و (b) EQE سلول خورشیدی پایه CIGS و سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده CIGS [۱۶]  
Figure (5): (a) J-V curves and (b) EQE of the baseline CIGS solar cell and the simulated CIGS solar cell

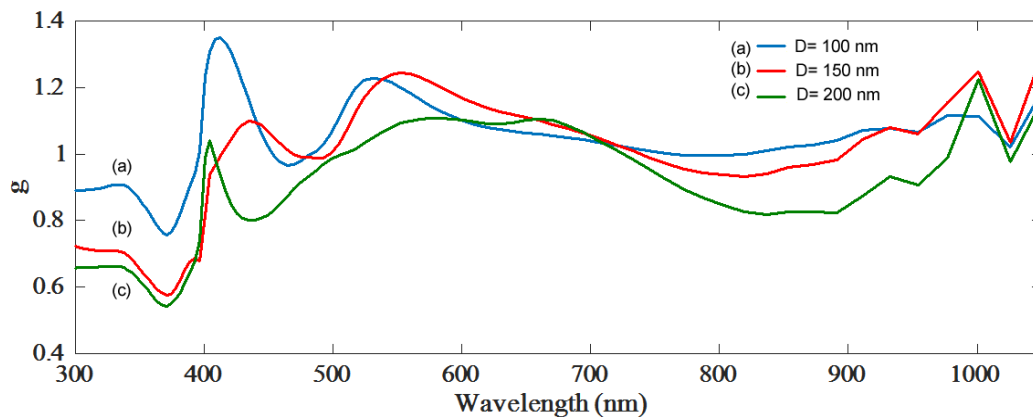


به عنوان گام دوم، نانوذرات کرومی و استوانه‌ای نقره به‌طور جداگانه در ناحیه شبیه‌سازی قرار داده شده‌اند [شکل (b-۴) و (c-۴)]. به عنوان تلاش اول در این فرآیند، نانوذرات نقره روی لایه پنجره‌ای ITO گذاشته شده‌اند (شکل (b-۴)). به منظور بیشینه کردن جذب نور به وسیله نانوذرات، بهینه‌سازی قطر و پرپود آرایه نانوذرات بسیار حیاتی است. برای بررسی تغییرات عملکرد سلول خورشیدی بدون استفاده از نانوذرات پلاسمونیک و با استفاده از نانوذرات پلاسمونیک، پارامتر افزایش جذب  $g$  و پارامتر جذب کلی  $G$  که به صورت زیر تعریف می‌شوند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۰].

$$g(\lambda) = \frac{QE_{NPs}}{QE_{Bare}} = \frac{P_{NPs}(\lambda)}{P_{Bare}(\lambda)} \quad (۴)$$

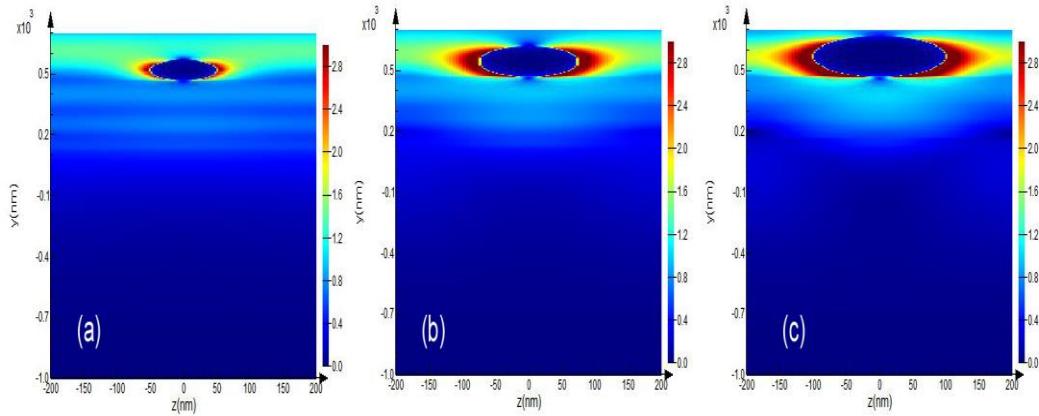
$$G(\lambda) = \frac{IQE_{NPs}}{IQE_{Bare}} = \frac{\int \lambda P_{NPs}(\lambda) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}{\int \lambda P_{Bare}(\lambda) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda} \quad (۵)$$

در رابطه‌های بالا  $QE_{NPs}$  و  $IQE_{NPs}$  عبارتند از بازدهی کوانتومی و بازدهی کوانتومی کل برای سلول خورشیدی آراییده با نانوذرات و  $QE_{Bare}$  و  $IQE_{Bare}$  بازدهی کوانتومی و بازدهی کوانتومی کل برای سلول خورشیدی بدون نانوذرات هستند. آنالیز افزایش جذب برای نانوذرات کرومی نقره از سه قطر مختلف ۱۰۰ و ۱۵۰ و ۲۰۰ نانومتر (پارامتر  $g$  (پارامتر افزایش جذب) در بازه طیفی وسیعی (۱۱۰۰ - ۳۰۰) نانومتر محاسبه شده که در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست یک پیک تیز حول ۴۰۰ نانومتر مشاهده می‌شود که مربوط به تشدید پلاسمون سطحی نقره است. بعلاوه، مقدار  $g$  با افزایش قطر نانوذرات کاهش یافته است. همچنین، فراتر از طول موج ۴۰۰ نانومتر به ازای قطر ۱۰۰ نانومتر ضریب  $g$  بزرگ‌تر از یک است که این امر نشان‌گر آن است که نانوذرات سبب افزایش شمار فوتون‌های جذب شده گردیده‌اند. به‌منظور فهم بهتر برهمکنش میان نانوذرات و نور فرودی، پروفایل جذب سلول خورشیدی مورد توجه قرار داده شده است. شکل (۷) پروفایل جذب را برای تشدید در طول موج ۵۷۵ نانومتر برای سلول خورشیدی CIGS بارگذاری شده به وسیله نانوذرات نقره در سه قطر مختلف نشان می‌دهد. مشخص است که نانوذرات نقره سبب افزایش جذب در درون سلول به وسیله پراکندگی رو به جلو ناشی از تشدید پلاسمون سطحی شده‌اند. همچنین، پراکندگی رو به جلو با قطر نانوذرات بیشتر شده است. به‌طور هم‌زمان پروفایل جذب، جذب شدیدی را در خود نانوذرات با افزایش قطر نشان می‌دهد. این جذب شدید موضعی می‌تواند باعث افزایش دمای قطعه گردد که به نوبه خود اثر مخربی بر کارکرد سلول‌های خورشیدی دارد. به‌طور عملی، آرایه‌های پرپودیک از نانوذرات فلزی بر روی سلول‌های خورشیدی قرار داده شده‌اند. بنابراین لازم است که تأثیر پرپودهای مختلف را در افزایش جذب نور بررسی کنیم. شکل (۸) فاکتور  $G$  (ضریب جذب کل) را به صورت تابعی از پرپود نشان می‌دهد. می‌توان دید که هم پرپود و هم قطر نانوذرات اثر مهمی بر روی جذب در سلول‌های خورشیدی CIGS می‌گذارند. یکی از جنبه‌های مربوط به نمودارهای  $G$  نشان داده شده آن است که مقدار  $G$  هنگامی که قطر نانوذره با پرپود برابر است کمترین مقدار خود را دارند و با افزایش قطر نانوذره به شدت افزایش می‌یابند. از روی شکل بیشینه مقدار  $G$  برابر ۱/۰۷ برای  $D$  برتر ۱۰۰ نانومتر و  $p$  برابر ۳۰۰ نانومتر است و برای قطرهای بزرگ‌تر از این کاهش می‌یابد.



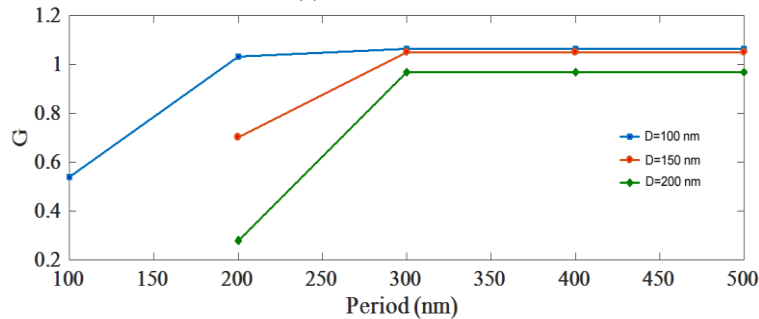
شکل (۶): طیف افزایش جذب  $g(\lambda)$  سلول خورشیدی CIGS با شعاع‌های مختلف نانوذرات نقره  
Figure (6): The absorption enhancement spectra  $g(\lambda)$  of the modelled CIGS solar cell with different radii of Ag NPs





شکل (۷): محاسبه پروفایل‌های جذب شده توسط FDTD برای سلول‌های خورشیدی CIGS که توسط نانوذرات کروی نقره با قطر (a) ۱۰۰ نانومتر، (b) ۱۵۰ نانومتر و (c) ۲۰۰ نانومتر در  $\lambda=575$  nm مرتب شده‌اند

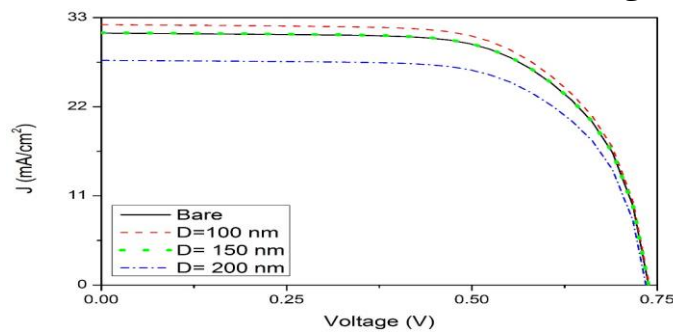
Figure (7): FDTD calculated absorption profiles for CIGS solar cell decorated by spherical Ag NPs with diameter of (a) 100 nm, (b) 150 nm and (c) 200 nm at  $\lambda=575$  nm



شکل (۸): تغییر فاکتور افزایش G با دوره تناوب قطرهای مختلف نانوذرات کروی

Figure (8): Variation of enhancement factor G with period at different diameters of spherical Ag NPs

بعلاوه، مقدار G به مقدار اندکی با بیشتر شدن p کاهش می‌یابد و به‌ازای D=100nm و D=150nm به مقدار یک میل می‌کند. این امر اشاره بر آن دارد که نانوذرات کوچک‌تر نقره با پرپود نسبتاً نزدیک به هم می‌توانند به طور مؤثرتری جذب را در سلول خورشیدی افزایش دهند. برای D=200nm مقدار G همواره کوچک‌تر از یک است و علت آن است که نانوذرات بزرگ‌تر می‌توانند میدان تراگسیل را به شدت تضعیف کنند. علاوه بر ویژگی‌های اپتیکی، ویژگی‌های الکتریکی سلول‌های خورشیدی CIGS به طور کمی مشخص‌یابی شد. نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است. مقدار پرپود در 300nm ثابت در نظر گرفته شده است. بطور مشخص، مشخصه  $v$ - $z$  نشان می‌دهد که در یک اندازه و پرپود مناسب، نانوذرات نقره می‌توانند بیشتر انرژی نور فرودی را در نواحی تشدید پلاسمونی جذب کنند.



شکل (۹): منحنی‌های J-V محاسبه شده برای سلول خورشیدی لخت (خط ممتد) و پلاسمونیک CIGS توسط نانوذرات کروی با قطرهای مختلف

Figure (9): The calculated J-V curves for the bare (solid line) and plasmonic CIGS solar cells decorated by spherical Ag NPs with different diameters

Table (2): A comparison of the J-V characteristics between the conventional and plasmonic CIGS solar cells with different diameters for Ag NPs at P=300 nm

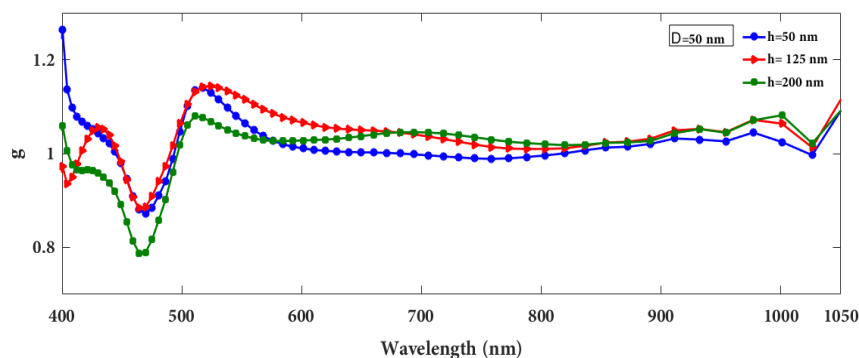
جدول (۲): مقایسه خصوصیات J-V بین سلول خورشیدی معمولی (لخت) و پلاسمونیک CIGS با قطرهای مختلف برای نانوذرات نقره در P = 300 نانومتر

Diameter of Ag NPs (nm)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF (%)	Efficiency (%)
Bare	۳۱/۴۰	۰/۷۴۲	۷۰	۱۶/۳
۱۰۰	۳۲/۱۳	۰/۷۴۵	۷۶	۱۷/۸
۱۵۰	۳۱/۴۱	۰/۷۴۳	۷۱	۱۶/۵
۲۰۰	۲۷/۷۲	۰/۷۳۸	۶۸	۱۴/۵

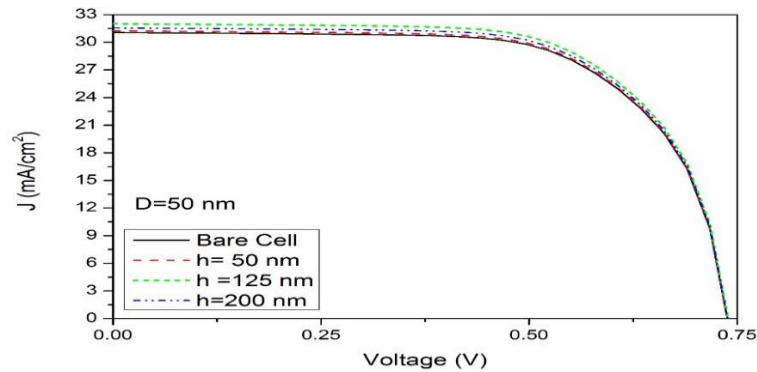
مقادیر متناظر J<sub>sc</sub> و V<sub>oc</sub> و ضریب پرشوندگی<sup>۱۴</sup> (FF) و بازده در جدول (۲) به صورت زیر لیست شده‌اند. مشاهده می‌شود که حضور نانوذرات پلاسمونیک در قطر بهینه ۱۰۰ نانومتر نه تنها سبب افزایش جریان نوری با تولید بیشتر زوج الکترون-حفره شده است، بلکه مقدار V<sub>oc</sub> را از مقدار ۰/۷۴۲ به ۰/۷۴۵ ولت و FF را از ۷۰ به ۷۶ درصد افزایش داده است. بهبود FF و V<sub>oc</sub> می‌تواند به کاهش بازترکیب سطحی در فصل مشترک cds/CIGS به عنوان پیامدی از میدان نزدیک شدید نانوذرات پلاسمونیک نقره نسبت داد.

در مرحله‌ی بعد، به منظور بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی CIGS از نانوذرات نقره استوانه‌ای استفاده شده است (شکل c-۴). از آنجا که استوانه دارای دو قاعده مسطح در بالا و پائین به قطر D که با یک لوله به ارتفاع h به هم وصل شده‌اند می‌باشد، مقادیر بهینه برای D و h باید تعیین گردند. شکل (۱۰) تغییرات g را به ازاء D=50nm در ارتفاع‌های مختلف h نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل دیده می‌شود، وقتی که قطر و ارتفاع استوانه با هم برابرند، یعنی نسبت h به D یک است، یک پیک باریک در ناحیه باند پلاسmoni نقره دیده می‌شود (یعنی ۵۰ تا ۵۶۰ نانومتر). وقتی نسبت h به D برابر ۲/۵ یا h=125nm باشد پیک متناظر پهن‌تر شده، در حالی که شدت آن تغییر نکرده است. افزایش بیشتر h سبب کاهش g شده است. این امر را می‌توان به جابجایی فاز میان میدان پراکندگی و میدان فرودی و همچنین جذب بیشتر به وسیله خود نانوذرات با نسبت h به D بزرگ‌تر نسبت داد. بدین ترتیب مقدار بهینه‌ای برای ارتفاع نانوذرات استوانه‌ای نقره وجود دارد. شکل (۱۱) منحنی‌های j-v محاسبه شده، برای سلول خورشیدی CIGS بدون نانوذرات پلاسمونیک و با ذرات پلاسمونیک استوانه‌ای با قطر ثابت و ارتفاع مختلف را نشان می‌دهد.

دیده می‌شود که V<sub>oc</sub> با h تغییر نمی‌کند و J<sub>sc</sub> به مقدار بیشینه ۳۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به ازاء h=125nm می‌رسد (همان‌گونه که از تغییرات g انتظار داشتیم).



شکل (۱۰): ضریب افزایش (g) با ارتفاع متفاوت نانوذرات استوانه‌ای نقره در D = 50nm  
Figure (10): The enhancement ratio g(λ) with different height of cylindrical Ag NPs at D=50 nm

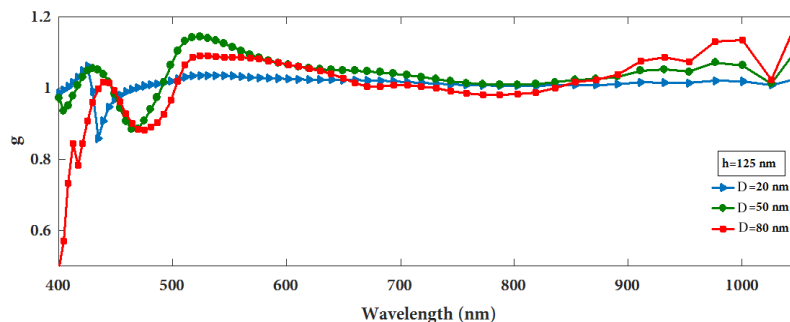


شکل (۱۱): منحنی‌های J-V محاسبه شده برای سلول‌های خورشیدی لخت (خط پیوسته) و پلاسمونی CIGS توسط نانوذرات استوانه‌ای نقره با D = 50nm در ارتفاع متفاوت

Figure (11): The calculated J-V curves for the bare (solid line) and plasmonic CIGS solar cells decorated by cylindrical Ag NPs with D= 50 nm at different height

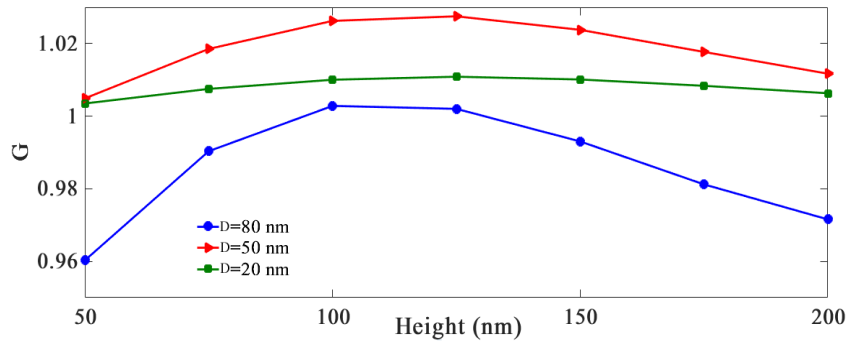
بنابراین  $h$  برابر ۱۲۵ نانومتر برای گام بعدی شبیه‌سازی در نظر گرفته خواهد شد. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که  $g$  چگونه به ازاء قطرهای مختلف در یک ارتفاع ثابت ( $h=125\text{nm}$ ) تغییر می‌کند. دیده می‌شود که  $g$  برای طول موج‌های کوچک‌تر از ۴۵۰ نانومتر به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بدان معنی که آهنگ جذب سلول خورشیدی با نانوذرات پلاسمونیک از سلول خورشیدی بدون نانوذرات هم کمتر می‌شود. به ازاء طول موج‌های واقع در این ناحیه، جذب به وسیله خود نانوذرات نقره غالب می‌شود. بدین ترتیب بخش قابل توجهی از نور پیش از آنکه وارد سلول خورشیدی شود، جذب می‌شود. از سوی دیگر، پیک ضعیفی به ازاء  $D=20\text{nm}$  در ناحیه باند پلاسمونی نقره مشاهده می‌شود و پس از آن نمودار  $g$  با الگویی یکنواخت پیرامون یک قرار می‌گیرد. علاوه بر این، بهترین آهنگ افزایش جذب به ازاء  $D$  برابر ۵۰ نانومتر در کل طیف به دست آمده است. همچنین، روشن است که نسبت افزایش به ازاء قطرهای بزرگ‌تر از ۵۰ نانومتر (یعنی ۸۰ نانومتر) در بخش بزرگی از ناحیه مرئی کاهش پیدا کرده است. این موضوع اشاره بر آن دارد که، نه قطرهای خیلی کوچک و نه قطرهای خیلی بزرگ برای نانوذرات استوانه‌ای نقره مناسب نیست.

شکل (۱۳) نشان می‌دهد که چگونه افزایش بازده کوانتومی یکپارچه<sup>۱۵</sup> (IQE) به صورت تابعی از ارتفاع استوانه در قطرهای مختلف تغییر می‌کند. می‌توان دید که هم قطر و هم ارتفاع تأثیر مهمی روی جذب در لایه CIGS دارند. همچنین، فاکتور  $G$  هنگامی که ارتفاع در بازه ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر است با افزایش قطر ابتدا زیاد می‌شود و سپس کاهش پیدا می‌کند. این رفتار را این‌گونه می‌توان توضیح داد که، زمانی که اندازه نانوذره افزایش می‌یابد، پیک تشدید پلاسمون بر حسب طول موج افزایش می‌یابد و تمایل به کاهش جذب در طول موج‌های کوتاه‌تر پیدا می‌کند، در حالی که در طول موج‌های بلندتر این تمایل به افزایش جذب است. از روی شکل (۱۰)، بیشترین افزایش جذب به ازاء  $D$  برابر ۵۰ نانومتر و  $h$  برابر ۱۲۵ نانومتر به دست آمده است. از آنجا که آهنگ افزایش برای  $D$  برابر ۸۰ نانومتر (شکل ۱۲) مقادیری بیشتر از یک را بخصوص در ناحیه باند پلاسمونی نشان داده، این رفتار می‌تواند نشانه‌ای از این واقعیت باشد که بیشتر نور فرودی به درون سلول راه نمی‌یابد بلکه بیشتر به وسیله خود نانوذرات نقره جذب می‌شوند.

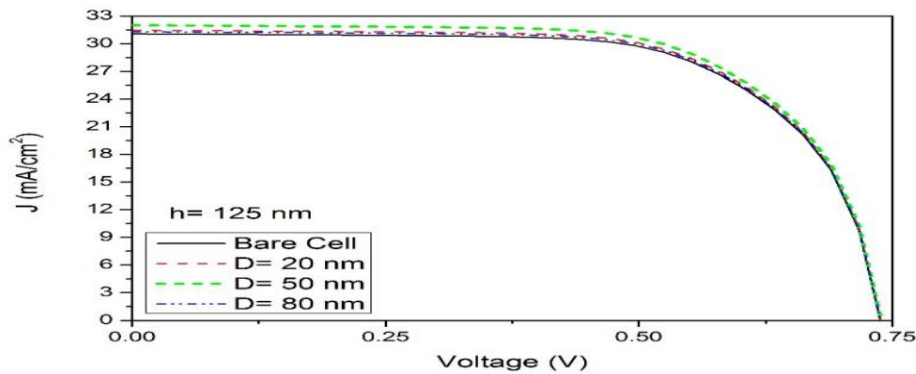


شکل (۱۲): نسبت افزایش  $g(\lambda)$  با قطرهای مختلف نانوذرات استوانه‌ای، در  $h=125\text{nm}$

Figure (12): The enhancement ratio  $g(\lambda)$  with different diameter of cylindrical Ag NPs at  $h=125\text{nm}$



شکل (۱۳): تغییر افزایش فاکتور  $G$  با ارتفاع نانوذرات استوانه‌ای نقره در قطرهای مختلف  
Figure (13): Variation of enhancement factor  $G$  with height of cylindrical Ag NPs at different diameters

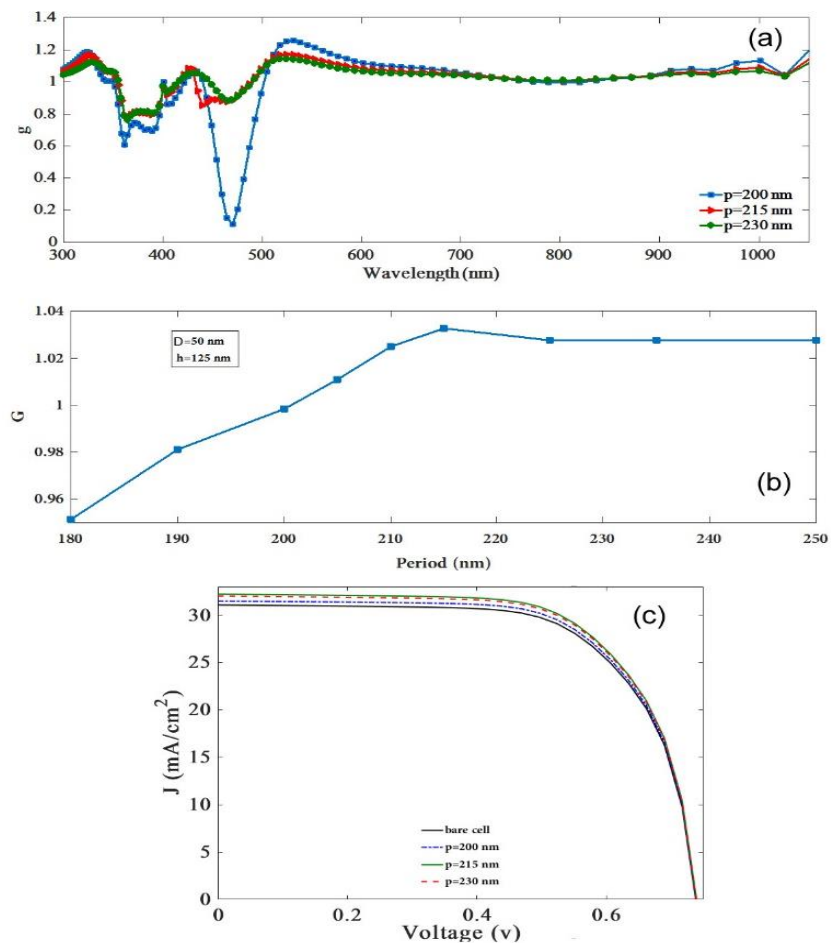


شکل (۱۴): منحنی  $J$ - $V$  سلول‌های خورشیدی لخت (خط پیوسته) و پلاسمونی CIGS با نانوذرات نقره‌ای استوانه‌ای با  $h=125$  nm در قطرهای مختلف

Figure (14): The calculated  $J$ - $V$  curves for the bare (solid line) and plasmonic CIGS solar cells decorated by cylindrical Ag NPs with  $h=125$  nm at different diameters

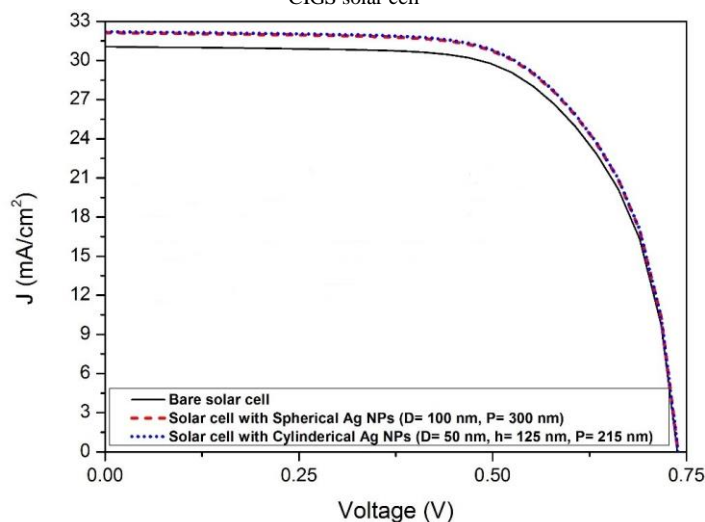
شکل (۱۴) منحنی‌های محاسبه شده  $J$ - $V$  برای سلول خورشیدی CIGS بدون نانوذرات و با نانوذرات نقره با ارتفاع ثابت در قطرهای مختلف قاعده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود بهترین نتیجه به ازاء  $D$  برابر ۵۰ نانومتر به دست آمده است. در گام پایانی بهینه‌سازی نانوذرات نقره، نانوذرات با  $h$  و  $D$  بهینه شده را به صورت آرایه‌ای روی بالاترین سطح سلول خورشیدی CIGS قرار می‌دهیم. شکل (۱۵) تغییرات  $g$  و  $G$  و منحنی‌های  $J$ - $V$  را به صورت تابعی از پرپود نشان می‌دهد. از روی نتایج مشخص است که، بهترین نتیجه به ازاء  $p$  برابر ۲۱۵ نانومتر به دست می‌آید. شکل (۱۶) به طور مقایسه‌ای، منحنی- $J$ - $V$  مربوط به سلول خورشیدی CIGS بدون نانوذرات، همراه با نتایج بهینه مربوط به سلول‌های خورشیدی CIGS با نانوذرات نقره کروی و استوانه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین، پارامترهای خروجی محاسبه شده به طور کمی در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

همان‌گونه که از نتایج دیده می‌شود، نانوذرات استوانه‌ای نقره سبب بهبود همه پارامترهای خروجی شده‌اند. به ویژه بازده حدود ۱۲/۳ درصد نسبت به سلول لخت افزایش نشان داده است. برای درک بهتر این که چرا نانوذرات استوانه‌ای افزایش بهینه را در تولید جریان الکتریکی موجب شده‌اند، یک مانیتور میدان-زمان سه بعدی مکعبی (که در لومریکال هست) را پیرامون نقطه‌ای که نانوذره نقره روی لایه پنجره‌ای قرار داده شده گذاشتیم. مشاهده شد که نانوذرات استوانه‌ای منجر به بیشترین مقدار پراکندگی رو به جلو که به نوبه خود تولید جریان الکتریکی بیشتر را سبب می‌شود گردیدند.



شکل (۱۵): تغییر منحنی‌های  $g$  (a)،  $G$  (b) و  $J$ - $V$  (c) به عنوان تابعی از دوره آرایش نانوذرات استوانه‌ای بارگیری شده روی سلول خورشیدی CIGS

Figure (15): Variation of (a)  $g$ , (b)  $G$  and (c)  $J$ - $V$  curves as a function of the period of the arrangements for cylindrical Ag NPs loaded on CIGS solar cell



شکل (۱۶): منحنی‌های  $J$ - $V$  سلول خورشیدی CIGS بدون نانوذرات و با نانوذرات نقره کروی و استوانه‌ای

Figure (16): Comparative representation of  $J$ - $V$  curves for the bare CIGS solar cell and the solar cell decorated by spherical (Spher) and cylindrical (Cyl) Ag NPs

Table (3): Parameters measured in naked cell state by applying cylindrical and spherical nanoparticles  
جدول (۳): پارامترهای اندازه‌گیری شده در حالت سلول لخت و با اعمال نانوذرات استوانه‌ای و کره‌ای

	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	Efficiency (%)
Bare	۳۱/۴۰	۰/۷۴۲	۷۰	۱۶/۳
Spher	۳۲/۱۳	۰/۷۴۵	۷۶	۱۷/۸
Cyl	۳۲/۲۱	۰/۷۴۶	۷۷	۱۸/۳

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی CIGS با بکارگیری نانوذرات پلاسمونیک نقره بررسی شد. برای انجام این کار، روش قدرتمند FDTD استفاده شد. رابطه‌ی میان شکل، اندازه و پرپود آرایه نانوذرات نقره و افزایش در ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی سلول‌های خورشیدی CIGS هنگامی که با نانوذرات مزدوج گردیدند مورد مطالعه قرار گرفته شد. از روی بررسی مفصل ارائه شده، مشخص شد که استفاده از نانوذرات پلاسمونیک استوانه‌ای بطور مؤثری پارامترهای اپتیکی و الکتریکی سلول خورشیدی را در قیاس با نانوذرات کره‌ای افزایش داد. بیشترین مقدار بازدهی ۱۸/۳ درصد برای سلول خورشیدی CIGS با نانوذرات استوانه‌ای نقره حاصل گردید. مونیتورینگ تولید جریان الکتریکی آشکار نمود که پراکندگی رو به جلو نور فرودی مربوط به نانوذرات استوانه‌ای بطور قابل توجهی بیشتر از نانوذرات کره‌ای بود که می‌تواند منجر به افزایش بیشتر بازدهی شود، هنگامی که ابعاد ساختار و پرپود آرایه بهینه‌سازی شده‌اند.

### References

#### مراجع

- [1] S. Madanian, S.M.A. Zanjani, "Investigating methods of electronic waste management and recycling of ever-increasing electronic wastes with emphasis on eco-friendly processes", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 41, pp. 61-71, Spring 2020 (in Persian).
- [2] G. Aghajani, D. Mirabbasi, B. Alfi, H. S. Hatami, "Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 8, no. 30, pp. 55-70, Summer 2017 (in Persian).
- [3] A.I. Hochbaum, P. Yang, "Semiconductor nanowires for energy conversion", Chemical Reviews, vol. 1, no.110, pp. 527-546, Oct. 2009 (doi: 10.1021/cr900075v).
- [4] H. Moradmamand Jazi, E. Adib, B. Fani, "Investigation and improvement of high step-up converters for pv module applications", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 7, no. 28, pp. 35-44, Winter 2017 (in Persian).
- [5] W. Yanqi, "Arrays of ZnO Nanowire for Photovoltaic Devices", Dissertation Submitted for PhD Degree, Department of Physics and Materials Science, City University of Hong Kong, 2009.
- [6] M.J. Jeng, Z.Y. Chen, Y.L. Xiao, L.B. Chang, J. Ao, Y. Sun, E. Popko, W. Jacak, L. Chow, "Improving efficiency of multicrystalline Si and CIGS solar cells by incorporating metal nanoparticles", Materials, vol. 8, no. 10, pp. 6761-6771, Oct. 2015 (doi: 10.3390/ma8105337).
- [7] S.C. Chen, Y.J. Chen, W.T. Chen, Y.T. Yen, T.S. Kao, T.Y. Chuang, Y.K. Liao, K.H. Wu, A. Yabushita, T. P. Hiseh, M.D.B. Charlton, D.P. Tsai, H.C. Kuo, Y.L. Chueh, "Toward omnidirectional light absorption by plasmonic effect for high-efficiency flexible nonvacuum Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells", ACS Nano, vol. 8, no. 9, pp. 9341-9348, Aug. 2014 (doi: 10.1021/nn503320m).
- [8] S. Royanian, A. Abdolazadeh Ziabari, R. Yousefi, "Efficiency enhancement of ultra-thin CIGS solar cells using bandgap grading and embedding Au plasmonic nanoparticles", Plasmonics, vol. 15, no. 4, pp. 1173-1182, Feb. 2020 (doi: 10.1007/s11468-020-01138-2).
- [9] S. Mohammadneghad, A. Bahrami, "Solar cells engineering basics of structures and technologies", 1<sup>th</sup> Edition, University of Science and Technology Publishing Center, Iran, Tehran, 2012 (in Persian).
- [10] S.A. Maier, "Plasmonics: Fundamentals and applications", Springer, New York, 2007 (doi: 10.1007/978-0-387-37825-1).
- [11] K.L. Chopra, P.D. Paulson, V. Dutta, "Thin-film solar cells: An overview", Progress in Photovoltaics, vol. 12, pp. 69-92, March 2004 (doi: org/10.1002/pip.541).
- [12] F.J Tsai, J.Y. Wang, J.J. Huang, Y.W. Kiang, C.C. Yang, "Absorption enhancement of an amorphous Si solar cell through surface plasmon induced scattering with metal nanoparticles", Optics Express, vol. 18, no. 52, pp. A207-A220, June 2010 (doi: org/10.1364/OE.18.00A207).

- [13] H.A. Atwater, A. Polman, "Plasmonics for improved photovoltaic devices", *Nature Materials*, vol. 9, no. 3, pp. 205-213, Feb. 2010 (doi: org/10.1038/nmat2629).
- [14] S. Pillai, K. Catchpole, T. Trupke, M. Green, "Surface plasmon enhanced silicon solar cells", *Journal of Applied Physics*, vol. 101, no. 9, Article Number: 093105, May 2007 (doi: org/10.1063/1.2734885).
- [15] R.S. Kim, J. Zhu, J.H. Park, L. Li, Z. Yu et al., "E-beam deposited Ag-nanoparticles plasmonic organic solar cell and its absorption enhancement analysis using FDTD-based cylindrical nanoparticle optical model", *Optics Express*, vol. 20, no. 12, pp. 12649-12657, May 2012 (doi.org/10.1364/OE.20.012649).
- [16] C.C. Chao, C.M. Wang, J.Y. Chang, "Spatial distribution of absorption in plasmonic thin film solar cells", *Optics Express*, vol. 18, no. 11, pp. 11763-11771, May 2010 (doi: org/10.1364/OE.18.011763).
- [17] Lumerical Solutions, Inc. <http://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>.  
Lumerical Solutions, Inc. <http://www.lumerical.com/tcadproducts/device/>.
- [18] E.D. Palik, "Handbook of optical constants of solids", vol. 3, Elsevier Science, Academic Press, New York, 1998.
- [19] W. Li, Sh. Xu, Y. Dai, P. Ma, Y. Feng, W. Li, H. Luo, Ch. Yang, "Improvement of the crystallinity and efficiency of wide-gap CIGS thin film solar cells with reduced thickness", *Materials Letters*, vol. 244, pp. 43-46, June 2019 (doi: org/10.1016/j.matlet.2019.02.031).
- [20] M. Amiri, A. Eskandarian, A. Abdolazadeh Ziabari, "Performance enhancement of ultrathin graded Cu(InGa)Se<sub>2</sub> solar cells through modification of the basic structure and adding antireflective layers", *Journal of Photonics for Energy*, vol.10, no. 2, Article Number 024504, June 2020 (doi: org/10.1117/1.JP-E.10.024504).

زیرنویس‌ها

---

- 1. Copper indium gallium selenium (CIGS)
- 2. Plasmonic nanoparticle (NPs)
- 3. Jeng
- 4. Multi-crystalline
- 5. Chen
- 6. Bandgap grading
- 7. Finite difference time domain (FDTD)
- 8. Air mass (AM)
- 9. Surface plasmons
- 10. Localized surface plasmons (LSPs)
- 11. Lumerical
- 12. Palik
- 13. External quantum efficiency (EQE)
- 14. Fill factor (FF)
- 15. Integrated quantum efficiency (IQE)