ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(07):443-453.

Steady-State and Transient Modeling of a Dye-Sensitized Solar Cell under Indoor Conditions Based on Sensitivity Analysis

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Rahmatian M.[1*]
Sayyadi H.[1]

How to cite this article
Rahmatian M, Sayyadi H, Steady-State and Transient Modeling of a Dye-Sensitized Solar Cell under Indoor Conditions Based on Sensitivity Analysis. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(07):443-453.*

ABSTRACT

Since dye-sensitized solar cells (DSSCs) have good efficiency in the visible region, they offer a promising way to generate sustainable energy, especially in indoor environments and building applications. Investigating the effect of dye specifications and photoanode thickness changes on cell performance is very important for improving DSSCs. This research focuses on the sensitivity analysis of the impact of important parameters to increase DSSC efficiency using a new numerical model considering factors such as radiation intensity and spectral composition, from conventional indoor light sources such as LED and fluorescent lights. These parameters include dye types, trapping parameters, diffusion coefficients, and photoanode thickness. This model examines steady and transient currents under internal radiation conditions, incorporates time/space-dependent relationships to increase accuracy, and examines electron, iodide, and triiodide interactions under different environmental conditions. The results showed that N749 and 20μm thickness of photoanode have the best effect on cell performance. This study presents a sensitivity analysis to find optimal parameters to improve DSSC performance in real indoor conditions opening avenues for further research in optimizing DSSC technology for indoor energy harvesting applications, thereby advancing the field of renewable energy and sustainable technology integration.

Keywords Indoor Photovoltaic, Dye-Sensitized Solar Cell, Dye, N749, Photoanode.

[1] Lab of Optimization of Thermal Systems Installations, Faculty of Mechanical Engineering-Energy Division, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Correspondence
Address: Lab of Optimization of Thermal Systems Installations, Faculty of Mechanical Engineering-Energy Division, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

m_rahmatian69@yahoo.com

Article History
Received: July 18, 2024
Accepted: October 15, 2024
ePublished: October 31, 2024

CITATION LINKS

1- Internet of Things (IoT) and the Energy Sector 2- Device characteristics and ...3- High-Efficiency Bifacial Dye-Sensitized Solar Cells for ... 4- Dye-Sensitized Solar Cell for Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Applications 5- Performance evaluation of a solar photovoltaic-thermal (PV/T) air collector system 6- Indoor photovoltaics: A numerical model of ... 7- A systematic review of a photoelectrical innovation: dye-sensitized solar cells 8- Enhancing the efficiency of transparent dye-sensitized solar cells using concentrated light 9- Dye-sensitized solar cells under ambient light powering machine learning... 10- Dye-sensitized solar cells (DSSCs) as a potential photovoltaic technology ... 11- Efficient dye-sensitized solar cells for direct conversion of sunlight to electricity 12- DFT and TD-DFT study of substituent effects on ... 13- A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films 14- A novel thermoelectrical model for dye-sensitized solar cells for consideration ... 15- Interpretation of the Time Constants Measured by Kinetic Techniques ... 16- Phenomenological modeling of dye-sensitized solar cells ... 17- An electrical model of the dye-sensitized solar cell 18- Dye-sensitized nanocrystalline solar cells 19- Correlation between Cell Performance and Physical Transport Parameters in Dye Solar Cells 20 - Electron Diffusion Model Based on I-V Data Fitting as the Calculation Method ... 21- Monte Carlo Random Walk Simulation of ... 22- Steady and transient modeling of dye-sensitive solar cells ... 23- Effect of Isothermal Conditions on ... 24- Partially nanowire-structured TiO2 electrode for dye-sensitized solar cells 25- Partially nanowire-structured TiO2 electrode for dye-sensitized solar cells, 26- Dye-Sensitized Solar Cells Based on ... 27- An alternate method to extract performance characteristics in dye sensitized solar cells 28- Efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs) through ... 29- Dye-sensitized solar cells: a successful combination of materials 30- Thin Films Characterization and ... 31- Fabrication and Photovoltaic Study of N749-Black Dye Based Solar Cell 32- Fabrication of panchromatic dye-sensitized solar cells using ... 33- Dye Nanoaggregate Structures in MK-2, N3, and N749 Dye···TiO2 Interfaces ... 34- Effective improvement of the photovoltaic performance of ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مدلسازی پایا و گذرای سلول خورشیدی حساس شده با رنگ در شرایط داخل اتاق بر اساس تحلیل حساسیت

منا رحمتیان [1*]، حسین صیادی[1]

[1] گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

از آنجایی که سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ کارایی مناسبی در ناحیه طیف مریی دارند، یک راه امیدوارکننده برای تولید انرژی پایدار، به‌ویژه در محیط‌های داخلی و کاربردهای ساختمانی، ارائه می‌کنند. بررسی تاثیر رنگدانه و همچنین تغییرات فوتوآند بر عملکرد سلول برای پیشبرد این سلول‌ها بسیار مهم است. این تحقیق بر تجزیه و تحلیل حساسیت اثر پارامترهای مهم برای افزایش کارایی این نوع سلول‌ها با استفاده از یک مدل عددی جدید با در نظر گرفتن عواملی مانند شدت تابش و ترکیب طیفی، از منابع نور معمولی داخلی مانند دیودهای ساطع نور تمرکز دارد. این پارامترها شامل انواع رنگدانه، پارامتر تله¬اندازی، ضریب انتشار و ضخامت فوتوآند است. این مدل جریان‌های پایا و گذرا را تحت شرایط تابش داخلی بررسی میکند و روابط وابسته به زمان/مکان را برای افزایش دقت ترکیب می‌کند و برهمکنش‌های الکترون، یدید و تری‌یدید را تحت شرایط محیطی مختلف بررسی می‌کند. نتایج نشان داد که رنگدانه N749 و ضخامت ۲۰میکرومتر فتوآند بهترین تاثیر را بر عملکرد سلول دارد. در نهایت بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده یک سلول با پارامترهای بهینه که بهترین علکرد را دارد معرفی شده‌است..

کلیدواژه‌ها: فتوولتاییک داخلی، سلول خورشیدی حساس شده با رنگ، رنگدانه، N749، فوتوآند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

*نویسنده مسئول: m_rahmatian69@yahoo.com

۱- مقدمه

پیشرفت سریع فناوری در استفاده گسترده از اینترنت اشیا در محیط خانه و محل کار مشهود است [1]. دستگاه‌های اینترنت اشیا اغلب به حسگرهایی متکی هستند که با باتری‌های یکبار مصرف تغذیه می‌شوند که نیاز به تعمیر و نگهداری قابل توجهی دارند و هزینه‌های بالایی را متحمل می‌شوند. یک جایگزین موثر برای استفاده از باتری، استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک است که انرژی خورشیدی را مهار می‌کنند. انرژی خورشید نه تنها عملکرد دستگاه‌های اینترنت اشیا را افزایش می‌دهد، بلکه مزایای زیست محیطی قابل توجهی را نیز در طول زمان ارائه می‌دهد [2, 3]. یکی دیگر از کاربردهای مهم سلول‌های خورشیدی، استفاده از آن‌ها در ساختمان‌های هوشمند جهت تامین برق بخشی از مصارف داخلی ساختمان است [4].

سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ تحت روشنایی داخلی برای تامین انرژی پایدار بسیار مهم هستند، به‌ویژه در جایی که منابع انرژی سنتی کمیاب یا سازگار با محیط‌زیست نیستند [5]. این مطالعه پتانسیل سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ را به عنوان یک منبع انرژی داخلی قابل اعتماد، جهت کاهش اتکا به برق شبکه و ارتقای پایداری انرژی برجسته می‌کند. با بررسی تحقیقات موجود، این مقاله درک جامعی از تکامل فناوری این سلول‌ها و نقش آن در پیشبرد یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر در داخل خانه ارائه می‌دهد. این بینش‌ها بر اهمیت سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ در دستیابی به راه حل‌های انرژی پایدار برای محیط‌های داخلی تاکید می‌کند [6]. بنابراین توسعه و بهبود نسل جدید این سلول‌ها بسیار مهم است. به طور کلی از ویژگی‌های سلول‌های خورشیدی نسل سوم در مقایسه با سلول‌های خورشیدی معدنی می‌توان به هزینه‌های تولید پایین، تنوع رنگ و شکل، انعطاف‌پذیری و وزن سبک اشاره کرد. با این حال، این سلول‌ها نسبت به سلول‌های خورشیدی معدنی کارایی کمتری دارند پس نیاز به بهبود و ارتقای قابل توجهی دارند [7].

ارزیابی پارامترهای مهم در این سلول‌ها می‌تواند به توسعه و بهبود عملکرد کمک کند. به عنوان مثال، سلواراج و همکارانش [8] رابطه بین شفافیت و عملکرد سلول حساس شده با رنگ را با تغییر ضخامت الکترود تیتانیوم دی اکساید بررسی کردند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، سلول با ضخامت ۱۰ میکرومتر راندمان ۵/۹۳٪ و جریان اتصال کوتاه برابر با ۱۲/۷۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع را نشان داد. در سال ۲۰۲۰، مایکلز و همکارانش [9] بر کاربردهای فتوولتاییک برای هوشمندسازی ساختمان‌ها و ارائه منابع انرژی بهینه برای شرایط داخلی تأکید کردند. نویسندگان سلول‌های فتوولتاییک نور محیط را برای تامین انرژی دستگاه‌های اینترنت اشیا گسترش دادند و نتایج قابل توجهی به دست آوردند. سلول‌های خورشیدی داخلی برای دستگاه‌های اینترنت اشیا که در آن‌ها دستگاه‌های ارتباطی، محرک‌ها و حسگرهای از راه دور نصب شده‌اند، سودمند هستند [10].

سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ اغلب از ترکیبات‌روتنیم پلی‌پیریدین به عنوان رنگ حساس‌کننده به دلیل خواص نوری و ردوکس مناسب استفاده می‌کنند. این ترکیبات شامل رنگ‌های N3، N749، N719 و Z907 برای حساس کردن دی‌اکسید تیتانیوم بسیار موثر بوده و به عنوان رنگ‌های معیار عمل می‌کنند [11]. پیشرفت قابل توجهی در اواخر دهه ۱۹۶۰ با کشف استفاده از کلروفیل مشتق شده از اسفناج به عنوان رنگ در دانشگاه کالیفرنیا آغاز شد. اولین الکترود اکسید روی حساس شده با کلروفیل در سال ۱۹۷۲ سنتز شد و تبدیل اولیه فوتون‌ها به الکتریسیته از طریق تزریق الکترون به یک شکاف نواری نیمه هادی را نشان داد [12]. اگرچه این سلول‌های اولیه به دلیل جذب محدود نور توسط تک لایه‌های رنگ، کارایی پایینی داشتند، اما افزایش تخلخل الکترود

باعث بهبود جذب رنگ و راندمان برداشت نور شد. تا سال ۱۹۹۱، محققان الکترودهای دی اکساید تیتانیوم نانومتخلخل با ضریب زبری حدود ۱۰۰۰ را توسعه دادند که بازده ۷٪ را به دست آوردند [13]. علیرغم بسیاری از مطالعات مرتبط ارائه شده تاکنون، بسیاری از شکاف‌ها و کاستی‌ها هنوز باید برطرف شوند. با توجه به بررسی ادبیات قبلی، ارزیابی اثر رنگدانه و ضخامت فوتوآند بر عملکرد سلول در شرایط تابش داخل اتاق می‌تواند به بهبود این نسل از سلول‌های خورشیدی کمک کند. در این تحقیق، برای توسعه بیشتر سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ، آنالیز حساسیت مدل عددی قبلی [6] انجام شده است و اثرات پارامترهایی مانند انواع رنگ، پارامترهای به دام انداختن، ضریب انتشار و ضخامت فوتوآند انجام شده است. علاوه بر اهمیت بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی بر عملکرد سلول، ارزیابی جریان گذرا و محاسبه همزمان چگالی الکترون بر اساس یون‌های الکترولیت می‌تواند دقت مدل ارائه شده را افزایش دهد. در این مدل علاوه بر جریان پایا که برای ترسیم مشخصه جریان-ولتاژ و سایر پارامترهای عملکردی استفاده می‌شود، جریان گذرا با زمان نسبت به مکان محاسبه شده است و تأثیر تغییرات پارامتر تله‌اندازی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نوآوری این تحقیق شامل ارزیابی چگالی جریان گذرا و پایا در سلول خورشیدی حساس شده با رنگ تحت تابش نور داخلی، بررسی تاثیر پارامتر تله‌اندازی بر جریان‌های گذرا و پایا، محاسبه چگالی الکترون بر اساس چگالی ذرات باردار الکترولیت، بررسی تأثیر رنگدانه‌های مختلف بر عملکرد سلول تحت تابش نور داخلی و همچنین بررسی تاثیر ضخامت فوتوآند و پارامترهای وابسته بر عملکرد سلول تحت تابش نور داخلی.

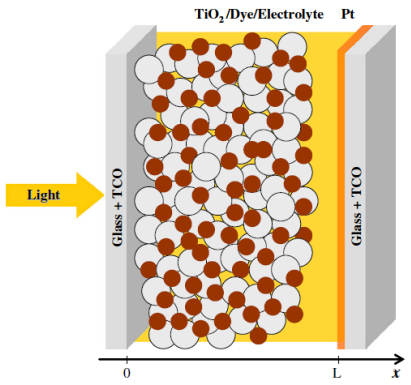
یکی دیگر از مزایای مدل موجود این است که معادلات پیوستگی و تابشی در سلول نسبت به زمان و مکان به طور همزمان حل می‌شوند که این مکان مربوط به ضخامت سلول و پارامتر زمان مربوط به مدت زمان پایدار شدن جریان سلول است (یعنی جریان گذرا و پایا). همچنین در هر حلقه حل، مقدار ولتاژ از صفر تا ولتاژ مدارباز اعمال می‌شود. این روش حل معادلات سبب افزایش دقت حل می‌شود و دید وسیع‌تر و دقیق‌تری برای تحلیل عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ می‌دهد. در این مدل همچنین، معادلات پیوستگی یون‌ها در کنار رابطه پیوستگی الکترون‌ها درنظر گرفته شده است که می‌تواند برای افزایش دقت محاسبات بسیار موثر باشد. این موضوع به تفصیل در نتایج شرح داده می‌شود. باتوجه به اینکه در مقالات قبلی سلول حساس شده با رنگ را به صورت عددی مدل کردیم [14]، مدل ما این قابلیت را دارد که با تغییر برخی از پارامترها از جمله استفاده از رنگدانه‌های مختلف که تاثیر بر مقدار تولید الکترون دارد، و همچنین تغییر ضخامت فوتوآند عملکرد سلول را بهینه‌سازی کنیم و مناسب‌ترین رنگدانه و سلول پیشنهاد شود. برای افزایش دقت و صحت مدل، علاوه بر جریان پایا در سلول، جریان گذرا نسبت به زمان و مکان در سلول ارزیابی می‌شود که این موضوع می‌تواند با انجام تحلیل حساسیت و پیدا کردن مقادیر مناسب برخی از پارامترها مانند ضریب تله‌افتادن الکترون‌ها به ارتقای عملکرد سلول کمک کند.

۲- مدل سازی و حل‌مسئله

این مدل جهت شبیه‌سازی انتقال الکترونی در نانوذرات نیم‌رسانای فلزی، یون‌های ید و تری‌ید در الکترولیت و مشخصه‌های جریان-ولتاژ در حالت پایا و گذرا به صورت یک بعدی حل شده است. ابتدا روابط دینامیکی مربوط به حامل‌های بار بدست آمده، سپس به ازای ولتاژ اعمالی از مقدار صفر تا مقدار ولتاژ مدارباز، چگالی ذرات و در نهایت جریان محاسبه می‌شود. در این مدل دو مفهوم اصلی استفاده شده‌است. مفاهیم شبه‌تراز فرمی که بیانگر تزریق الکترون به نوار رسانش نیم‌رسانا و ایجاد گرادیان حامل به دلیل تابش نور و همچنین مدل تله‌انداز چندگانه که در آن فرض می‌شود، الکترون‌ها در ترازهای توسعه یافته جابجا می‌شوند ولی در حین حرکت به تناوب به دام تله‌های سطحی افتاده و از آن‌ها خارج می‌شوند [15]. در نهایت با تقریب شبه استاتیک فرض می‌شود فرآیندهای به تله افتادن و رهایی از آن‌ها بسیار سریعتر از انتقال الکترونی و بازترکیب آن‌ها می‌باشد. در شکل ۱ طرحواره‌ای از سلول ترسیم شده است که ابعاد سلول و جهت محور x را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فوتوآند در x=0 واقع شده است و با حرکت در راستای ضخامت سلول از این نقطه مقدار x افزایش می‌یابد و با عبور از رنگدانه و الکترولیت به کاتد در نقطه x=L می‌رسد. مدل عددی ارائه شده در فاصله x=0 تا x=L حل می‌گردد.

این مدل بصورت پایا و وابسته به زمان و مکان حل شده است به طوریکه در رابطه (۱) نشان داده شده است [16]:

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = -\frac{\partial J_j}{\partial x} + G_j(x) - R_j(x)\ , j = e^-, I_3^-, I^- \qquad (۱)$$



شکل ۱) طرحواره اجزا سلول حساس شده با رنگ برای حل مسئله [16]

عبارت سمت چپ معادله نشان دهنده شار حامل است. عبارت سمت راست معادله با سابقه چگالی حامل j مطابقت دارد و عبارت دوم و سوم به ترتیب نرخ تولید و بازترکیب ذره j است.

انتقال یون‌ها در الکترولیت تاثیر بسیار زیادی در عملکرد سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ را دارد که در بسیاری از مطالعات پیشین این معادلات نادیده گرفته شده‌اند. تولید دو الکترون سبب تولید یک یون تری-یدید و از بین رفتن سه یون یدید می‌شود. نرخ تولید و بازترکیب آن‌ها به صورت رابطه (۲) و (۳) نوشته می‌شود [17].

$$G_{tri}(x,\lambda) - R_{tri}(x,t) = \frac{1}{2}(G_e(x,\lambda) - R_e(x,t)) \qquad (۲)$$

$$G_i(x,\lambda) - R_i(x,t) = -\frac{3}{2}(G_e(x,\lambda) - R_e(x,t)) \qquad (۳)$$

که Gi، Gtri، Ri و Rtri به ترتیب نرخ تولید و بازترکیب یدید و تری‌یدید می‌باشند. معادلات پیوستگی برای الکترون و یون‌های الکترولیت مطابق با مدل رحمتیان و همکارانش [14] در نظر گرفته شده و به کمک شرایط مرزی با حل عددی، چگالی ذرات محاسبه شده‌اند.

چگالی جریان از رابطه (٤) بدست می‌آید که شامل جریان رانشی و پخشی می‌باشد. در این مدل‌سازی میدان الکتریکی کوچک در نظر گرفته شده‌است، بنابراین می‌توان از جریان رانشی صرفنظر کرد [18، 19] و فقط گرادیان الکترون در نقطه x=0 که سبب تولید جریان پخشی می‌شود را محاسبه کرد [۲۰].

$$j_i = eD_i \ \partial n/\partial x + en_i \ \mu_i \ E \qquad (۴)$$

که e، E، Di، iμ و ni به ترتیب، بار الکترون، میدان الکتریکی، ضریب پخش، قابلیت حرکت و چگالی ذره می‌باشد. در سمت راست رابطه فوق عبارت اول جریان پخش و عبارت دوم جریان رانشی می‌باشد.

در معادله (۱) عبارت ($Ge(x,\lambda)$) و ($Re(x,t)$) به ترتیب تولید و بازترکیب الکترون می‌باشند که از روابط (۵) و (٦) محاسبه می‌شوند [14].

$$G_e(x) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \phi I_0(\lambda)\alpha(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x)\,d\lambda \qquad (۵)$$

$$R_e(x,t) = k_0\left\{n_c(x,t)^{\beta}\sqrt{\frac{n_{tri}(x,t)}{n_i(x,t)} - n^{0\beta}}\sqrt{\frac{n_{tri0}}{{n_i}^3}}n_i(x,t)\right\} \qquad (۶)$$

در معادله (۵) پارامتر I0(λ) میزان تابش بر سلول می‌باشد که از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد. α(λ)، λmin و λmax به ترتیب مربوط به ضریب جذب رنگدانه و بازه طیف جذب رنگدانه می‌باشند. φ نیز بازده کوانتومی است. در معادله (٦) پارامتر β ضریب غیرخطی بازترکیب است که برابر ۱ در نظر گرفته شده‌است [21]. در این معادله n_c (x,t),n_tri (x,t),n_i (x,t), ⟦ n⟧ ^0, ⟦ n⟧ _tri0, ⟦ n⟧ _i0 به ترتیب مربوط به غلظت الکترون در نوار رسانش، چگالی یون‌های تری‌یدید و یدید، غلظت اولیه الکترون در نوار رسانش، چگالی اولیه یون‌های تری‌یدید و یدید می‌باشند.

$$I_0(\lambda) = \frac{2fc}{\lambda^4}\left[\frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_b T}\right)}\right] \qquad (۷)$$

در نهایت جریان پخشی در x=0 برابر است با:

$$(x,t) = eD(n)(dn(x,t))/dx \qquad (۸)$$

در مدل ارائه شده، مدل الکتریکی و تابشی باهم تلفیق می‌شوند و همزمان اثرات تابش، طول موج طیف تابش و دمای سطح سلول بر روابط الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که سلول تحت تابش خورشید است، این داده‌های ورودی بر اساس اطلاعات هواشناسی و روابط خورشیدی محاسبه می‌شوند اما در شرایط تابش داخلی باتوجه به شرایط منبع تابش (نوع لامپ مورد استفاده) این اطلاعات استخراج می‌شود. بنابراین این روابط به صورتی که در زیر شرح داده شده‌است، درمی‌آیند.

برای محاسبه میزان تولید الکترون در سلول، از رابطه (۵) استفاده می‌شود که در این رابطه مقدار تابش به سطح سلول به کمک پارامتر I0 وارد روابط می‌گردد که در این مدل ترموالکتریکی، این متغیر بر اساس شرایط تابش جایگذاری می‌شود. این پارامتر توسط رابطه (۷) محاسبه می‌شود که در این معادله f پارامتری برای تاثیر مقدار تابش برخوردی است، λ طول موج طیف تابش منبع نور و T دمای سطح سلول ناشی از تابش که در شرایط داخلی برابر با دمای اتاق می‌باشد.

۳- نتایج

۳-۱- مدل‌سازی در شرایط استاندارد (AM1.5)

این مدل به صورت عددی برای الکترون‌ها در نانو ذرات نیمه‌رسانای فلزی و یون‌ها در الکترولیت با حل معادلات دیفرانسیل در نرم‌افزار متمتیکا ۹ انجام شده است و مشخصه‌های جریان-ولتاژ در حالت پایا و گذرا محاسبه شده‌اند. در مرحله اول سلول با توجه به شرایط آزمایشگاهی و تحت این نوع تابش (AM1.5) مدل شده است که در این مدل داده‌های ورودی به صورت زیر می‌باشند (جدول ۱).

در این مدل الکتریکی جریان اتصال‌کوتاه برابر ۱۰۱/۶ آمپربرمتربع و ولتاژ مدارباز ۷۶۵ میلی‌ولت می‌باشد. با محاسبه مقدار سایر پارامترهای عملکردی سلول، میزان توان حداکثر، بازده و فاکتور انباشت به ترتیب ۶۶/۵۴ وات بر مترمربع، ۶/۶۵۴ % و ۰/۸۶۴ به دست آمد. این مدل در مقالات قبلی اعتبارسنجی شده است [6، 14].

با توجه به اینکه نوع الکترولیت نقش بسیار مهمی در عملکرد سلول دارد، پس حامل‌های آن نیز به علت احیای رنگدانه برای

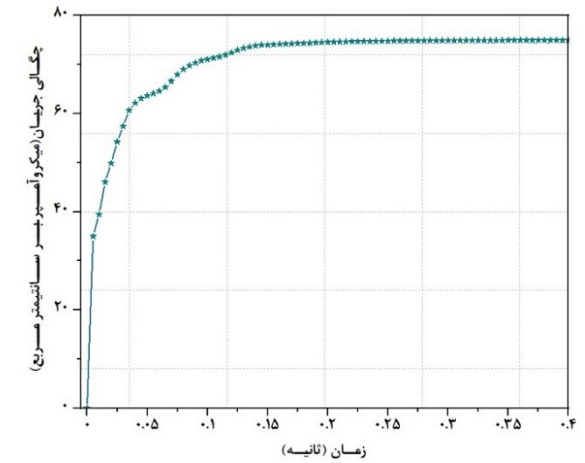
تکمیل فرآیند تزریق الکترون بسیار مهم هستند. در مدل ارائه شده چگالی یون‌های یدید و تری‌یدید توسط روابط پیوستگی الکترولیت حل شده‌اند، که این موضوع می‌تواند یک مزیت مهم برای مدل عددی موجود باشد. طبق محاسبات، در مکان x=0 چگالی یون یدید کم و در مکان الکترود مقابل مقدار آن افزایش می‌یابد. در عوض روند یون تری‌یدید بالعکس می‌باشد و علت آن اینست که با افزایش بازترکیب در حین حرکت به سمت کاتد، چگالی این یون کاهش می‌یابد.

جدول ۱) پارامترهای ورودی [14]

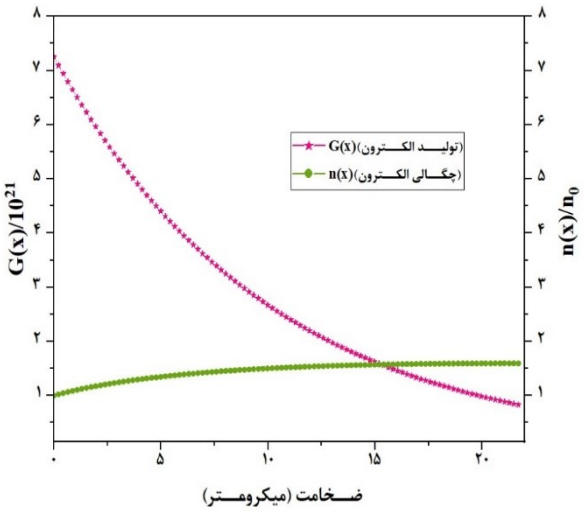
پارامتر	نماد	مقدار	واحد
چگالی الکترونی	n0	1016	برسانتی‌مترمکعب
چگالی یون یدید	ni0	1020	برسانتی‌مترمکعب
چگالی یون تری یدید	ntri0	1019	برسانتی‌مترمکعب
ضریب پخش الکترون	D0	6×10-6	سانتی‌مترمربع بر ثانیه
ضریب پخش یون یدید	Di	6×10-7	سانتی‌مترمربع بر ثانیه
ضریب پخش تری یدید	Dtri	5×10-7	سانتی‌مترمربع بر ثانیه
تخلخل الکترولیت	θed	5/0	-
ثابت بازترکیب	$kR0$	1×10-9	بر ثانیه
بار الکترون	e	602/1×10-19	کولن
پارامتر تله‌اندازی	α	5/0	-

۳-۲- تفسیر جریان گذرا و پایا در شرایط تابش داخلی

مدل‌سازی ارائه شده، به صورت روابط وابسته به زمان و مکان حل شده است که باعث می‌شود دقت این مدل‌سازی بیشتر شود. جمله مکان مربوط به ضخامت سلول می‌باشد اما جمله زمان در واقع مدت زمان پایدار شدن جریان در سلول است. در مدل‌سازی و همچنین در شرایط واقعی برای محاسبه جریان در سلول خورشیدی باید ابتدا یک ولتاژ اولیه اعمال شود. زمانی که ولتاژ اعمال می‌شود t=0 است و بعد از این زمان جریان کم‌کم به وجود می‌آید و در یک بازه زمانی به اندازه کافی بزرگ و بی‌نهایت (مثلا ۱ثانیه) جریان از مقدار صفر به مقدار پایا خود می‌رسد که این جریان پایا همان جریان مرتبط با ولتاژ ورودی است که برای ترسیم نمودار جریان-ولتاژاستخراج می‌شود (با اعمال ولتاژ از صفر تا به عبارت دیگر معادلات وابسته به زمان حل می‌شوند تا زمان t=ts که جریان پایا می‌شود. در واقع از لحظه t=0 تا t=ts مقدار جریان گذرا محاسبه می‌شود تا زمانی که جریان دیگر افزایش پیدا نمی‌کند و به مقدار ثابتی می‌رسد، که این مقدار ثابت همان جریان پایایی است که در محاسبات اصلی استفاده می‌شود [22]. این بازه زمانی پایدار شدن به مشخصات ذاتی سلول بستگی دارد و در سلول‌های مختلف، متفاوت است.



شکل ۲) جریان گذرا تحت تابش ال‌ای‌دی ۳۰۰۰کلوین نسبت به زمان در x=0



شکل ۳) وابستگی مکانی تولید الکترون و چگالی الکترون در سلول در راستای ضخامت سلول

۳-۳- بررسی برخی پارامترها در شرایط تابش داخلی

درفتار چگالی حامل‌ها در سلول مهم‌ترین عامل در تعیین پارامترهای عملکردی آن می‌باشد. برای بررسی میزان تولید الکترون‌ها و چگالی الکترون و همچنین تغییرات آن‌ها در راستای ضخامت سلول، مدل ترموالکتریک برای شرایط تابش تحت نور ال‌ای‌دی درون اتاق حل شده است و میزان تغییرات آن‌ها در شکل ۳ آمده است. این نمودار رفتار وابسته به مکان چگالی الکترونی و تولید الکترون‌ها را نشان می‌دهد.

همانطور که در نمودار ۳ مشخص است، میزان تولید الکترون در نقطه x=0 یعنی محل فوتوالکترود تیتانیوم دی اکساید، به علت دریافت تابش توسط مولکول‌های رنگ و برانگیخته شدن آن¬ها، بیشترین میزان خود را دارد. اما رفته رفته با عبور از الکترولیت و نزدیک شدن به الکترود مقابل، این میزان کاهش و در مقابل مقدار بازترکیب افزایش می‌یابد. با مشاهده شکل ۳ می‌بینیم که میزان چگالی الکترون در نقطه x=0 یعنی در محل فوتوآند تیتانیوم دی

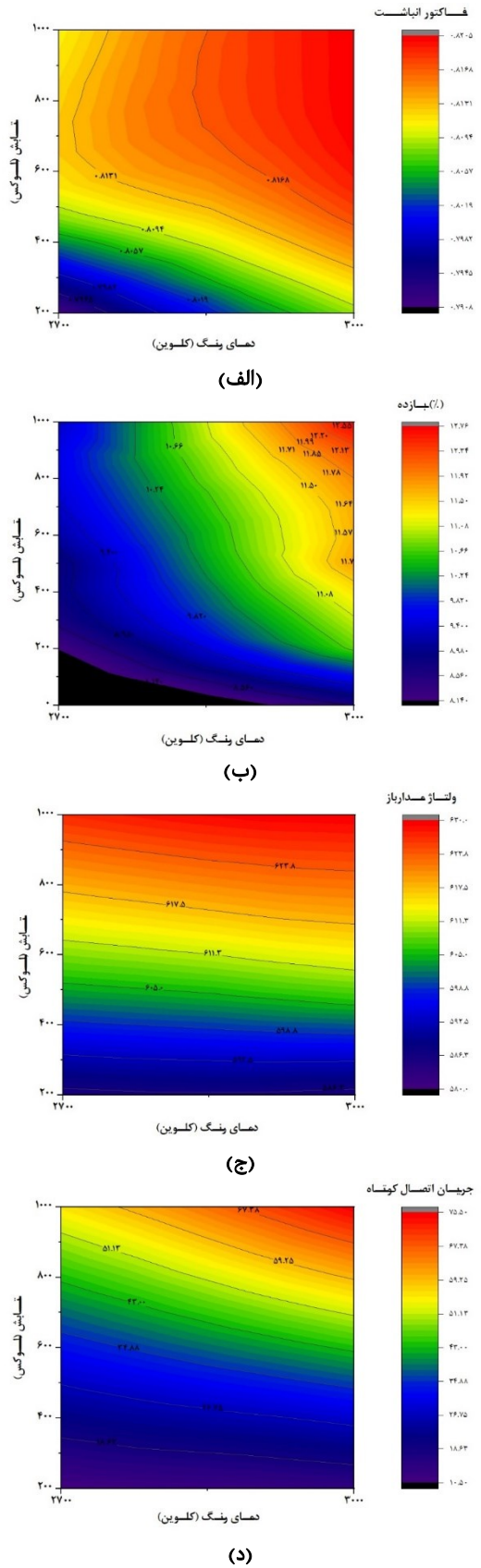
اکساید، بسیار کم است ولی گرادیان آن بسیار زیاد است که نشان می‌دهد این نقاط بیشترین سهم را در تولید جریان پخشی دارند. با افزایش مقدار x چگالی الکترون به دلیل واکنش‌های درون سلول، افزایش یافته اما از گرادیان آن کاسته می‌شود. جریان تولید شده در سلول در نقطه x=0 توسط یک مدار خارجی از سلول خارج می‌شود و همین موضوع سبب بالا بودن مقدار تولید الکترون در الکترود کاری و کم بودن چگالی الکترون در این مکان می‌شود.

اشکل ۴ پارامترهای عملکرد سلول را بر اساس شدت تابش در ۲ دمای رنگ ۲۷۰۰ و ۳۰۰۰ کلوین نشان می-دهد که مطابق پژوهش پیشین بهترین و بدترین مقادیر راندمان و توان خروجی را در این نوع لامپ دارند. همانطور که در نمودارهای کانتورینگ مشاهده می‌شود، بالاترین مقدار راندمان و جریان اتصال‌کوتاه در لوکس ۱۰۰۰ برای ال‌ای‌دی با دمای رنگ ۳۰۰۰کلوین است، اما مقدار فاکتور انباشت در شدت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ لوکس دارای مقادیر بالاتری نسبت به ۲۰۰ لوکس است. این مقادیر نشان می‌دهد که دمای رنگ بیشترین تأثیر را بر فاکتور انباشت دارد. در ضمن برای پارامتر ولتاژ مدار باز، بیشترین مقدار مربوط به لوکس ۱۰۰۰ در هر دو ال-ای‌دی است که نشان می‌دهد شدت تابش نسبت به سایر پارامترها تاثیر بیشتری بر ولتاژ مدار باز دارد.

۳-۴- بررسی اثر تغییرات ضخامت فوتوآند بر عملکرد سلول

یدر این قسمت ابتدا با انجام تحلیل حساسیت بر حسب تغییر ضخامت سلول و پارامتر تله‌اندازی عملکرد سلول در شرایط تابش داخلی تحت نور ال‌ای‌دی ۳۰۰۰ کلوین بهینه‌سازی شده است. سپس بر اساس نتایج به دست آمده، اثرات تغییر ضخامت فوتوآند تیتانیوم دی اکساید بر عملکرد سلول بررسی شده است. در مرحله اول مقدار پارامتر تله‌اندازی که مربوط به تله‌افتادن و فرار الکترون‌ها در زیر لایه نیمه‌رسانا می‌باشد که در معادله پیوستگی و شرایط مرزی اثر دارد، از مقدار ۰/۵ تا ۲/۵ تغییر داده شده و نتایج آن در نمودار ۵ و ۶ قابل مشاهده است.

همانطور که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود، با تغییر مقدار ضریب تله¬اندازی در سلول، مدل جریان گذرا تغییر می‌کند. دلیل این موضوع، وابستگی فرآیند تله‌اندازی و فرارالکترون به زمان است. به عبارت دیگر، وجود تله در نیم‌رسانا به علت وابسته به زمان بودن فرآیند تله‌اندازی، رفتار گذرای سلول را تحت تاثیر قرار می‌دهد [15، 23]. با افزایش میزان این ضریب جریان دیرتر به مقدار پایا خود می‌رسد، در حالیکه در مقدار ۰/۵ این پارامتر، علیرغم نوسانی که در مقدار جریان گذرا وجود دارد، در زمان حدود ۰/۲ ثانیه جریان پایا می‌شود. بنابراین مقدار کمتر پارامتر تله‌اندازی به علت تزریق بیشتر الکترون به نوار رسانش نیمه‌رسانا سبب افزایش جریان گذرا



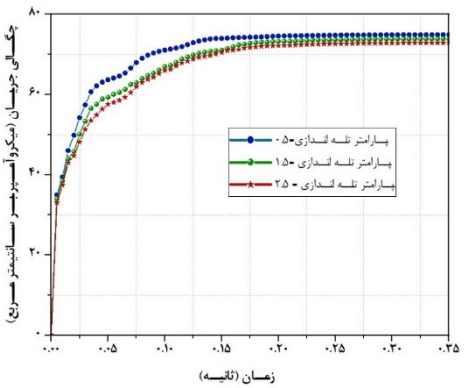
(الف)

(ب)

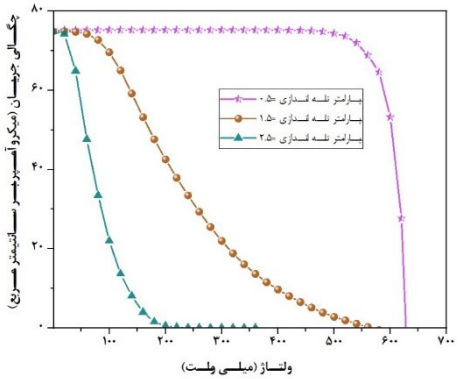
(ج)

(د)

شکل ۴) پارامترهای عملکرد بر اساس تابش و دمای رنگ برای ال‌ای‌دی ۳۰۰۰ و ۲۷۰۰ کلوین [6]



شکل ۵) جریان گذرا نسبت به زمان بر حسب مقادیر مختلف پارامتر تله‌اندازی



شکل ۶) نمودار جریان-ولتاژ بر حسب مقادیر مختلف پارامتر تله‌اندازی

همانطور که در شکل ۶ مشخص است، افزایش پارامتر تله‌اندازی سبب کاهش فاکتور انباشت در سلول می-شود، زیرا نمودار جریان-ولتاژ از حالت مربعی و ایده‌آل خارج شده است. در این شرایط توان بیشینه که برابر با حداکثر مقدار حاصل‌ضرب جریان در ولتاژ است نیز کاهش یافته است. علاوه بر فاکتور انباشت، ولتاژ مدار باز نیز با افزایش پارامتر تله‌اندازی کاهش یافته است. علت این موضوع اینست که هرچه مقدار تله‌اندازی بیشتر باشد سطح تله‌های کم عمق‌تر در نوار رسانش بیشتر است و سبب افزایش بازترکیب الکترون با یون‌های الکترولیت می‌شود [15].

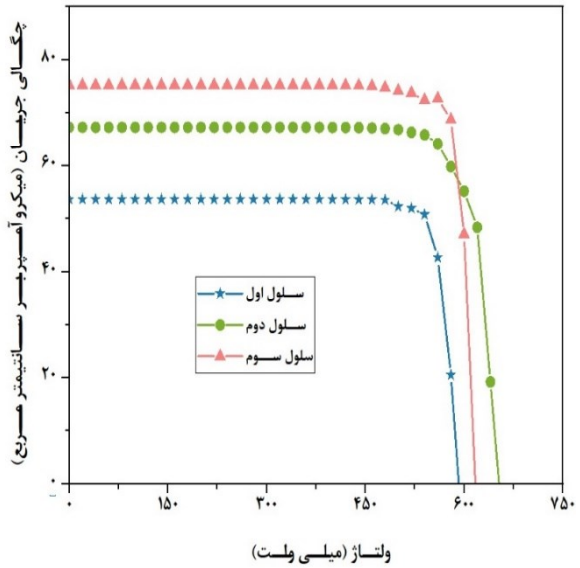
پارامتر بعدی که تغییرات آن بر عملکرد سلول باید بررسی شود، ضخامت سلول است. این ارزیابی در پژوهش قبلی انجام شده و نتایج ارائه گردید [6]. با توجه به نتایج و همچنین ارزیابی اثر پارامتر تله‌اندازی بر عملکرد سلول می‌توان مشاهده کرد که افزایش پارامتر تله‌اندازی بشدت بر روی فاکتور انباشت و بازده تاثیر دارد و سبب کاهش آن‌ها می‌شود. در حالیکه افزایش ضخامت تاثیر بسیار کمی بر این دو پارامتر داشته است. در مورد تاثیر ضخامت بر جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز می‌توان گفت که افزایش ضخامت به دلیل افزایش میزان بازترکیب الکترون ناشی از افزایش سطح موثر سبب کاهش ولتاژ مدارباز می‌شود، در حالیکه این کاهش ولتاژ و شیفت مثبت نوار رسانش نیمه‌رسانا باعث افزایش تزریق الکترون توسط ترازهای پایین‌تر رنگدانه در نوار رسانش نیمه‌رسانا و به دنبال آن افزایش جریان اتصال کوتاه می‌شود [25]. یکی دیگر از دلایل کاهش ولتاژ مدار باز با افزایش ضخامت، اینست که افزایش ضخامت سبب افزایش چگالی تله می‌شود و الکترون‌ها به دلیل تله افتادن و فرار کردن بیشتر، با سرعت کمتری انتقال پیدا می‌کنند و در نتیجه بازترکیب الکترون با یون‌های الکترولیت بیشتر می‌شود [26].

با توجه به نتایجی که از مراحل فوق به دست آمد، ارزیابی تاثیر تغییر ضخامت فوتوآند تیتانیوم دی‌اکساید می‌تواند برای به دست آوردن مشخصات بهینه سلول، کمک کند. تغییر ضخامت فوتوآند سبب تغییر در ضخامت کل سلول می‌شود. از طرفی این افزایش ضخامت فوتوآند در شرایط واقعی و در آزمایش‌های تجربی باعث تغییر در شرایط جذب نور رنگدانه می‌شود، بنابراین برای اثردهی این موضوع، تغییرات ضخامت فوتوآند با تغییر پارامترهای تله‌اندازی، ضریب پخش و ضخامت سلول در مدل‌سازی اعمال می‌شود.

پارامتر ضریب پخش با تغییرات ضخامت تغییر می‌کند، زیرا از طریق رابطه مقدار ضریب پخش به دلیل تغییر در چگالی تله‌های موجود در نیمه‌رسانا ناشی از تغییر ضخامت، به ضخامت سلول وابسته می‌شود (زمان انتقال الکترون‌ها و d ضخامت سلول است) [27]. در این قسمت، ۳ سلول با شرایط ذکر شده در جدول ۲ که از مدل تجربی آقای عامری و همکارانش [27] گرفته شده، ارزیابی می‌شوند.

نتایج این تحلیل در جدول ۲ و در نمودار ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سلول سوم با وجود اینکه فاکتور انباشت کمتری دارد، اما نسبت به دو سلول دیگر بازده و جریان اتصال کوتاه بیشتری دارد.

همانطور که گفته شد هرچه ضخامت فوتوآند افزایش پیدا کند به دنبال آن ضخامت سلول نیز افزایش می‌یابد و سایر پارامترها نیز



شکل ۷) نمودار جریان-ولتاژ بر حسب مقادیر مختلف ضخامت فوتوآند

از مقادیر تجربی مقالات [27] استخراج شده‌اند. با دقت در جدول ۲ و نمودار ۷ مشاهده می‌شود که، با افزایش ضخامت فوتوآند پارامترهای عملکردی از جمله بازده و جریان اتصال‌کوتاه افزایش می‌یابند به طوریکه سلول سوم با ضخامت ۲۰ میکرومتر دارای بیشترین بازده با مقدار۱۳/۶۳٪ و جریان اتصال کوتاه ۷۵/۲۳ میکروآمپر بر سانتی‌مترمربع می‌باشد. طبق توضیحاتی که در قسمت قبلی مطرح شد، با افزایش ضخامت فوتوآند که منجر به افزایش ضخامت و افزایش پارامتر تله‌اندازی می‌شود، مقدار ولتاژ مدار باز کاهش می‌یابد زیرا افزایش میزان بازترکیب الکترون ناشی از افزایش سطح موثر سبب کاهش ولتاژ مدارباز می‌شود و همچنین افزایش چگالی تله سبب افزایش بازترکیب الکترون با یون‌های الکترولیت بیشتر می‌شود [26]. در حالیکه این کاهش ولتاژ و شیفت مثبت نوار رسانش نیمه‌رسانا باعث افزایش تزریق الکترون توسط ترازهای پایین‌تر رنگدانه در نوار رسانش نیمه‌رسانا و به دنبال آن افزایش جریان اتصال‌کوتاه می‌شود [25]. البته در شرایط تغییر ضخامت فوتوآند، فقط ضخامت و پارامتر تله‌اندازی تغییر نمی‌کنند بلکه ضریب پخش الکترون نیز متغیر است. بنابراین سلول سوم تمام پارامترهای عملکردی آن بجز ولتاژ مدارباز بیشتر از سلول اول و دوم می‌باشد. در نهایت نتایج تحلیل و تغییرات پارامترها و نمودار مشخصه را می‌توان با نتایج تجربی ارائه شده در پژوهش آقای عامری و همکارانش [27] صحت‌سنجی کرد.

۳-۵- بررسی اثر انواع رنگدانه بر عملکرد سلول

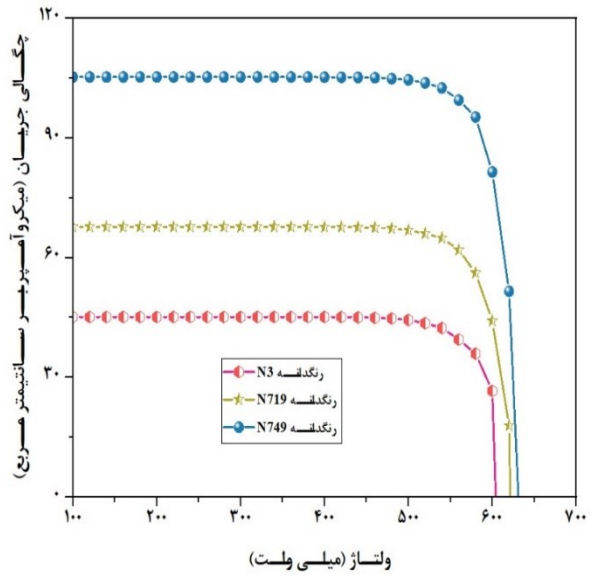
یکی دیگر از اجزای مهم سلول رنگدانه‌ها می‌باشند بنابراین تغییر نوع رنگدانه می‌تواند بر عملکرد سلول تاثیر بگذارد. این تغییرات، توسط روابط ذکر شده در فصل قبلی در مدل‌سازی اعمال شده‌اند. تفاوت این سه رنگدانه جدا از تغییرات ضریب جذب (که برای جلوگیری از پیچیدگی حل و فقط ارزیابی اثر طول موج جذب این مقدار ثابت در نظر گرفته شده است) در رنگ و طول موج جذب آن‌ها می‌باشد. برای مثال رنگ روتینیوم N3 قرمز می‌تواند در محدوده جذبی ۲۰۰-۷۵۰ نانومتر قرار بگیرد، در حالیکه رنگدانه سیاه N749 تا ۹۰۰ نانومتر نیز می‌تواند جذب کند [28، 29]. طبق رابطه (۵) که مربوط به تولید الکترون در سلول می‌باشد، بازه طول موج رنگدانه توسط کران بالا و پایین انتگرال، وارد روابط می‌شود. در این قسمت سه رنگدانه متفاوت N3، N719 و N749 برای شرایط تابش داخلی تحت نور ال‌ای‌دی ۳۰۰۰کلوین در نظر گرفته شده است. نتایج این تحلیل در جدول ۳ و نمودار ۸ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۸۷ مشاهده می‌شود، بهترین عملکرد مربوط به سلول با رنگدانه سیاه N749 است. دلیل این موضوع هم جذب بیشتر رنگدانه و هم طیف وسیع‌تر جذب می‌باشد. این موضوع در منابع مشابه نیز قابل اعتبارسنجی است [30، 31]. N749-BDیکی از بهترین حسگرهای رنگی به دلیل خواص الکترونیکی و اپتوالکترونیکی مناسب و جذب نور در محدوده وسیع طیف مریی و پایداری حرارتی و شیمیایی در شرایط محیطی است [32، 33]. علیرغم رنگ سبز تیره آن، به دلیل جذب قابل توجه آن در طیف وسیعی از نور مریی (~۹۲۰ نانومتر) به عنوان "رنگ سیاه" شناخته شده است. قابل ذکر است، تنها N749-BD پتانسیل گسترش طیف جذب نور را به محدوده قرمز دارد، که باعث می‌شود این رنگ قادر به دستیابی به راندمان برداشت نور بالاتر و در نتیجه بازده بالاتر برای سلول شود [۳۴].

مطابق با تحقیقات معتبر انجام شده [30، 31] تغییرات در بازده و جریان اتصال کوتاه بر حسب تغییر نوع رنگدانه بسیار بیشتر از تغییرات ولتاژ مدار باز و فاکتور انباشت است که این موضوع در نتایج کار ارائه شده در این بخش نیز قابل مشاهده است.

۳-۶- ارزیابی سلول بهینه

با توجه به نتایج تحلیل حساسیت‌هایی که در بخش‌های قبلی بر اساس پارامترهای ضخامت فوتوآند، ضریب تله‌اندازی، ضریب انتشار و نوع رنگدانه انجام شد، سلول بهینه با بهترین عملکرد را می‌توان پیشنهاد داد. سلول با رنگدانه نوع N749-BD که دارای مشخصات ذاتی سلول سوم می‌باشد بهترین عملکرد را دارد. با اعمال این تغییرات در مدل‌سازی، عملکرد این سلول بهینه به صورت جدول ۴ گزارش می‌شود.



شکل۸) نمودار جریان-ولتاژ بر حسب مقادیر مختلف ضخامت فوتوآند

جدول۲) مشخصات سلول‌های مورد ارزیابی و نتایج آن

	ضخامت (میکرومتر)	ضریب پخش (مترمربع بر ثانیه)	تله‌اندازی	ولتاژ مدارباز (میلی‌وات)	جریان اتصال کوتاه (میکروآمپر بر سانتیمترمربع)	بازده (%)	فاکتور انباشت	(میکروووات بر سانتیمترمربع)
سلول اول	590	68/53	678/9	931/0	295/0	29/0	3/1	10
سلول دوم	650	26/67	65/11	813/0	355/0	3/0	3/1	7/15
سلول سوم	615	23/75	63/13	898/0	416/0	35/0	2/2	20

جدول۳) نتایج به دست آمده برای سلول با رنگدانه‌های متفاوت

نوع رنگدانه	توان بیشینه (میکروووات بر سانتیمترمربع)	فاکتور انباشت	بازده (%)	جریان اتصال کوتاه (میکروآمپر بر سانتیمترمربع)	ولتاژ مدارباز (میلی‌وات)
N719-D	23/0	81/0	49/7	14/45	625
N3-D	35/0	82/0	49/11	71/67	630
N749-BD	56/0	83/0	28/18	33/105	635

جدول ٤) مشخصات و عملکرد سلول با پارامترهای بهینه

نوع سلول	توان بیشینه (میکروووات بر سانتیمترمربع)	فاکتور انباشت	بازده (%)	جریان اتصال کوتاه (میکروآمپر بر سانتیمترمربع)	ولتاژ مدارباز (میلی‌وات)
سلول سوم با رنگدانه N749	۰/۵۶	۰/۸۲	۱۸/۴۵	۱۰۵/۹۹	۶۴۵

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، توسعه سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ با انجام یک تحلیل حساسیت جامع و بهینه‌سازی یک مدل عددی ترموالکتریک تحت تابش نور داخلی ارزیابی شده است. در این مطالعه اثرات پارامترهای مختلف بر عملکرد سلول، از جمله انواع رنگدانه‌ها، پارامتر تله‌اندازی، ضریب انتشار و ضخامت فوتوآند ارزیابی شده است.

یافته‌های کلیدی این مطالعه عبارتند از:

• مشخصه جریان-ولتاژ: ویژگی‌های ولتاژ-جریان در حالت پایدار و گذرا به دقت محاسبه شدند و تأثیر شرایط عملیاتی مختلف بر عملکرد این سلول‌ها بیان شد.

• تولید و چگالی الکترون: روابط دینامیکی حامل‌های بار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و چگالی ذرات برای ولتاژهای اعمال شده از ۰ تا ولتاژ مدارباز محاسبه شد. این موارد شامل روابط وابسته به زمان/مکان برای افزایش دقت مدل است و برهمکنش‌های الکترون، پدید و تری‌یدید را تحت شرایط محیط داخلی مختلف بررسی می‌کند.

• ضخامت فوتوآند: تغییرات ضخامت فوتوآند به طور قابل توجهی بر عملکرد سلول تأثیر می‌گذارد و اهمیت بهینه‌سازی این پارامتر برای بهبود کارایی سلول را برجسته می‌کند.

• انواع رنگدانه‌ها: انواع رنگدانه‌های مختلف از نظر تأثیر آن‌ها بر عملکرد سلول مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داد که ویژگی برخی از رنگدانه‌ها می‌تواند عملکرد کلی سلول را تحت تاثیر قرار دهد.

بکارگیری مفهوم سطح شبه فرمی و مدل تله چندگانه در این چارچوب عددی امکان درک دقیق فرآیندهای تزریق، انتقال و بازترکیب الکترون را فراهم می‌کند. یافته‌های ما بر نقش کلیدی متغیرهای محیطی مانند شدت نور و ترکیب طیفی در رفتار این سلول‌ها تأکید می‌کند.

این مطالعه با ارائه آنالیز حساسیت برای پیدا کردن پارامترهای بهینه جهت ارتقای عملکرد سلول¬های حساس شده با رنگ در شرایط داخلی، راه‌هایی را برای تحقیقات بیشتر در بهینه‌سازی این سلول‌ها برای کاربردهای برداشت انرژی در محیط داخلی باز می‌کند و در نتیجه زمینه انرژی‌های نو و یکپارچه‌سازی فناوری پایدار را پیش می‌برد.

در نتیجه، این تحقیق بینش‌های ارزشمندی را در مورد بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ، ارائه مسیرهایی برای افزایش کارایی و قابلیت اطمینان آن‌ها در شرایط دنیای واقعی، ارائه می‌کند. بررسی سایر اجزای مهم در سلول از جمله انواع الکترولیت و الکترود مقابل می‌تواند به بهبود و ارتقای این سلول‌ها کمک کند. مدل توسعه‌یافته ابزاری قوی برای اکتشاف و اصلاح بیشتر فناوری‌های این سلولها است.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با سایر سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

منابع مالی: توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

منابع

1- Hossein Motlagh N, Mohammadrezaei M, Hunt J, Zakeri B. Internet of Things (IoT) and the energy sector. Energies. 2020 Jan 19;13(2):494.
2- Venkateswararao A, Ho JK, So SK, Liu SW, Wong KT. Device characteristics and material developments of indoor photovoltaic devices. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2020 Jan 1;139:100517.
3- Venkatesan S, Lin WH, Teng H, Lee YL. High-efficiency bifacial dye-sensitized solar cells for application under indoor light conditions. ACS applied materials & interfaces. 2019 Oct 16;11(45):42780-9.
4- Szindler M, Szindler M, Drygała A, Lukaszkowicz K, Kaim P, Pietruszka R. Dye-sensitized solar cell for building-integrated photovoltaic (BIPV) applications. Materials. 2021 Jul 4;14(13):3743.
5- Dunne NA, Liu P, Elbarghthi AF, Yang Y, Dvorak V, Wen C. Performance evaluation of a solar photovoltaic-thermal (PV/T) air collector system. Energy Conversion and Management: X. 2023 Oct 1;20:100466.
6- Rahmatian M, Sayyaadi H, Ameri M. Indoor photovoltaics: A numerical model of dye-sensitized solar cells based on indoor illumination for the Internet of Things applications. Energy Conversion and Management: X. 2024 Apr 1;22:100606.
7- Rahmatian M, Sayyaadi H. A systematic review of a photoelectrical innovation: dye-sensitized solar cells. International Journal of Ambient Energy. 2024 Dec 31;45(1):2366538.
8- Selvaraj P, Baig H, Mallick TK, Siviter J, Montecucco A, Li W, Paul M, Sweet T, Gao M, Knox AR, Sundaram S. Enhancing the efficiency of transparent dye-sensitized solar cells using concentrated light. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2018 Feb 1;175:29-34.
9- Michaels H, Rinderle M, Freitag R, Benesperi I, Edvinsson T, Socher R, Gagliardi A, Freitag M. Dye-sensitized solar cells under ambient light powering machine learning: towards autonomous smart sensors for the internet of things. Chemical Science. 2020;11(11):2895-906.
10- Aslam A, Mehmood U, Arshad MH, Ishfaq A, Zaheer J, Khan AU, Sufyan M. Dye-sensitized solar cells (DSSCs) as a potential photovoltaic technology for the self-powered internet of things (IoTs) applications. Solar Energy. 2020 Sep 1;207:874-92.
11- Kalyanasundaram K, Grätzel M. Efficient dye-sensitized solar cells for direct conversion of sunlight to electricity. Material Matters. 2009;4(4):88-90.
12- Han J, Liu T, Li J, Song P, Li Y. DFT and TD-DFT study of substituent effects on structure, spectroscopic and photoelectric characteristics of DA dyes for solar cells. Materials Science in Semiconductor Processing. 2024 Aug 1;178:108421.
13- O'regan B, Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films. nature. 1991 Oct 24;353(6346):737-40.
14- Rahmatian M, Sayyaadi H, Ameri M. A novel thermoelectrical model for dye-sensitized solar cells for consideration of the effects of solar irradiation, wavelength, and surface temperature. Solar Energy. 2023 Dec 1;266:112140.
15- Bisquert J, Vikhrenko VS. Interpretation of the time constants measured by kinetic techniques in nanostructured semiconductor electrodes and dye-sensitized solar cells. The Journal of Physical Chemistry B. 2004 Feb 19;108(7):2313-22.
16- Andrade L, Sousa J, Ribeiro HA, Mendes A. Phenomenological modeling of dye-sensitized solar cells under transient conditions. Solar Energy. 2011 May 1;85(5):781-93.
17- Ferber J, Stangl R, Luther J. An electrical model of the dye-sensitized solar cell. Solar Energy Materials and Solar Cells. 1998 May 12;53(1-2):29-54.
18- Peter LM. Dye-sensitized nanocrystalline solar cells. Physical Chemistry Chemical Physics. 2007;9(21):2630-42.
19- Gentilini D, Gagliardi A, Auf der Maur M, Vesce L, D'Ercole D, Brown TM, Reale A, Di Carlo A. Correlation between cell performance and physical transport parameters in dye solar cells. The Journal of Physical Chemistry C. 2012 Jan 12;116(1):1151-7.
20- Diantoro M, Hidayat A, Supardi ZI, Budi S. Electron diffusion model based on IV data fitting as the calculation method for DSSC internal parameters. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 Apr 1 (Vol. 515, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
21- Ansari-Rad M, Abdi Y, Arzi E. Monte Carlo random walk simulation of electron transport in dye-sensitized nanocrystalline solar cells: influence of morphology and trap distribution. The Journal of Physical Chemistry C. 2012 Feb 9;116(5):3212-8.
22- Rahmatian M, Sayyaadi H. Steady and transient modeling of dye-sensitive solar cells: The impact of electrode thickness and dye specifications. Energy Conversion and Management: X. 2024 Oct 1;24:100709.
23- Boukezzi L, Rondot S, Jbara O, Ghoneim SS, Boubakeur A, Abdelwahab SA. Effect of isothermal conditions on the charge trapping/detrapping parameters in e-beam irradiated thermally aged XLPE insulation in SEM. Materials. 2022 Mar 4;15(5):1918.
24- Suzuki Y, Ngamsinlapasathian S, Yoshida R, Yoshikawa S. Partially nanowire-structured TiO2 electrode for dye-sensitized solar cells. Open Chemistry. 2006 Sep 1;4(3):476-88.
25- Suzuki Y, Ngamsinlapasathian S, Yoshida R, Yoshikawa S. Partially nanowire-structured TiO2 electrode for dye-sensitized solar cells. Open Chemistry. 2006 Sep 1;4(3):476-88.
26- Jennings JR, Ghicov A, Peter LM, Schmuki P, Walker AB. Dye-sensitized solar cells based on oriented TiO2 nanotube arrays: transport, trapping, and transfer of

electrons. Journal of the American Chemical Society. 2008 Oct 8;130(40):13364-72.
27- Ameri M, Mohajerani E, Samavat F, Raoufi M. An alternate method to extract performance characteristics in dye sensitized solar cells. Optik. 2018 Feb 1;154:640-55.
28- Wante HP, Aidan J, Ezike SC. Efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs) through atmospheric pressure plasma treatment of photoanode surface. Current Research in Green and Sustainable Chemistry. 2021 Jan 1;4:100218.
29- Longo C, De Paoli MA. Dye-sensitized solar cells: a successful combination of materials. Journal of the Brazilian Chemical Society. 2003;14:898-901.
30- Tahir M, Din IU, Zeb M, Aziz F, Wahab F, Gul Z, Alamgeer, Sarker MR, Ali S, Ali SH, Kymissis I. Thin Films Characterization and Study of N749-Black Dye for Photovoltaic Applications. Coatings. 2022 Aug 12;12(8):1163.
31- Tahir M, Din IU, Aziz F, Wahab F, Sarker MR, Alamgeer A, Ali SH. Fabrication and Photovoltaic Study of N749-Black Dye Based Solar Cell.
32- Lim J, Lee M, Balasingam SK, Kim J, Kim D, Jun Y. Fabrication of panchromatic dye-sensitized solar cells using pre-dye coated TiO 2 nanoparticles by a simple dip coating technique. RSC advances. 2013;3(14):4801-5.
33- Deng K, Cole JM, Rawle JL, Nicklin C, Chen H, Yanguas-Gil A, Elam JW, Stenning GB. Dye nanoaggregate structures in MK-2, N3, and N749 dye center dot center dot center dot TiO2 interfaces that represent dye-sensitized solar cell working electrodes. ACS APPLIED ENERGY MATERIALS. 2020 Jan 1;3(1):900-14.
34- Chang S, Wong KY, Xiao X, Chen T. Effective improvement of the photovoltaic performance of black dye sensitized quasi-solid-state solar cells. RSC advances. 2014;4(60):31759-63.