

مطالعه و شبیه سازی تأثیر پوشش پانل فتوولتائیک روی سقف گلخانه بر نور مورد نیاز محصول

چکیده: در تحقیق پیش رو، دو فاکتور مهم سایه اندازی و نوردهی روزانه ناشی از پوشش سقف گلخانه با پانل فتوولتائیک برای یک گلخانه نمونه خورشیدی تک دهانه ۶۰ مترمربعی با سقف شیبدار ۲۰ درجه در شهر تهران مورد تحلیل قرار گرفت. ارزیابی با دو روش تقریبی (منتج شده از کد ۴۷۴ سازمان برنامه و بودجه کشور) و روش دقیق (شبیه سازی با نرم افزار دیزاین بیلدر) انجام شده و نتایج بدست آمده ابتدا با یکدیگر و سپس با داده های تجربی یک گلخانه خورشیدی واقع در اروپا مقایسه شد. بررسی نتایج نشان می دهد در اکثر محصولات گلخانه ای، نور مورد نیاز محصول تا نرخ پوشش ۵۰ درصد از کل سقف گلخانه توسط صفحات خورشیدی به خوبی تأمین می شود. همچنین مقایسه روش تقریبی و شبیه سازی بیانگر این حقیقت است که در ماه هایی از سال با شدت تابش اندک، خطای اندازه گیری فاکتور سایه اندازی با روش تقریبی قابل توجه بوده و در حدود ۲۴ درصد می باشد، اما در ماه های با شدت تابش زیاد این درصد خطا به میزان ۴ درصد کاهش یافته که قابل چشم پوشی است.

واژه های راهنما: گلخانه خورشیدی، پانل فتوولتائیک، نرخ پوشش، فاکتور سایه اندازی، پارامتر نوردهی روزانه، نرم افزار دیزاین بیلدر، شبیه سازی نور طبیعی

سیاوش منیعی
دانشجوی دکتری

مهدی معرفت*

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مصطفی محمودی

فارغ التحصیل دکتری،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی،
تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

Siavash Maniee
PhD Candidate

Mehdi Maerefat*
Professor,

Faculty of Mechanical
Engineering,
Tarbiat Modares University,
Tehran

Mostafa Mahmoodi
PhD Alumni,

Department of Mechanical
Engineering, K. N. Toosi
University of Technology,
Tehran

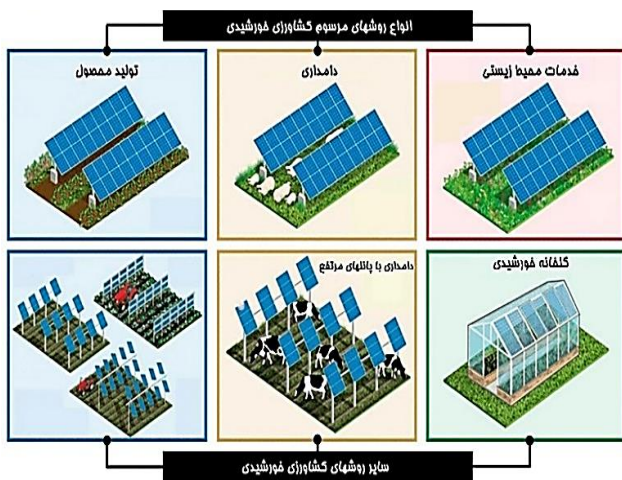
Study and simulation of the effect of roof-mounted photovoltaic panels of the greenhouse on the crop light

Abstract: In the present study, the average shading factor resulting from the percentage of roof coverage with photovoltaic panels was investigated for a 60-m² single-span solar greenhouse with a 20-degree pitched roof, located in Tehran. The evaluation was carried out using two approximate method (derived from code 474 of the National Planning and Budget Organization) and exact method (daylighting simulation by Design Builder software), and then the results were compared with each other and with experimental data from a solar greenhouse in Europe. The results indicate that the required crop light is well supplied up to a roof coverage ratio of 50 percent by photovoltaic panels. In addition, comparing two approximate and simulation methods reveals the fact the percentage error of shading factor between approximate and simulation methods for low-irradiance months is significant (nearly 24%), while the same error decreases to around 4% for high-irradiance months of the year, which is negligible.

Keywords: Solar greenhouse, Photovoltaic panel, Coverage ratio, Shading factor, DLI factor, Design Builder software, Daylighting simulation

۱- مقدمه

تعیین‌کننده بوده که برای به حداکثر رساندن انرژی خورشیدی جذب شده در پانل‌ها و محصولات کشاورزی باید مورد توجه قرار گیرند. در این میان، متغیر اصلی در نظر گرفته شده زاویه شیب صفحات خورشیدی است، البته متغیرهای دیگری نیز مانند موقعیت جغرافیایی نصب، نوع محصول انتخابی، ارتفاع پانل و شدت تابش خورشید در بهینه شدن سیستم مؤثر است [۴].



شکل ۱ معرفی شاخه‌های مختلف کشاورزی خورشیدی [۴]

استفاده دوگانه از زمین برای کشاورزی و تولید انرژی می‌تواند رقابت برای منابع زمین را کاهش دهد و فشار کمتری را برای تبدیل مناطق طبیعی به زمین‌های کشاورزی بیشتر ایجاد کند. شبیه‌سازی‌های اولیه در پژوهشی توسط دوپراز و همکاران در سال ۲۰۱۱ انجام شد که نشان می‌داد کارایی کاربری زمین می‌تواند ۶۰ الی ۷۰ درصد در سیستم‌های کشاورزی خورشیدی افزایش یابد [۳]. همچنین یک مطالعه تجزیه و تحلیل چرخه زندگی نشان داد که سیستم مذکور مبتنی بر مرتع دارای یک هم‌افزایی دوگانه است که در نتیجه آن انتشار گازهای گلخانه‌ای ۶۹/۳ درصد کاهش یافته و ۸۲/۹ درصد انرژی فسیلی کمتری نیز در مقایسه با تولید سنتی نیاز است [۵].

استفاده از گلخانه خورشیدی از طریق نصب پانل‌های فتوولتائیک به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که اصلی‌ترین آنها عبارتند از [۶]:

- نصب صفحات خورشیدی به صورت ثابت روی سقف گلخانه و با چیدمان‌های مختلف
- نصب پانل‌های متحرک روی سقف با قابلیت تنظیم زاویه
- نصب پانل‌های فتوولتائیک نوین با قابلیت عبور نور

رشد مناسب و کیفیت نهایی محصولات گلخانه‌ای، ارتباط مستقیمی با میزان و طول موج نور دریافتی آنها دارد. لذا شناخت پارامترهای کمی و کیفی نور داخل گلخانه و همچنین اثرات انواع سایه‌اندازها بر میزان نور جذب‌شده توسط محصول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عمده‌ترین منبع انرژی نوری گیاه در گلخانه از طریق نور مستقیم خورشید در طول روز است. البته در مواقعی که نور خورشید به دلیل موقعیت جغرافیایی محل و یا شرایط نصب گلخانه جابجایی رشد مناسب گیاه نباشد، می‌توان از منابع نوری مصنوعی به عنوان منابع نوری جایگزین استفاده کرد که اصلی‌ترین آنها عبارتند از: لامپ فلورسنت، متال هالید، سدیم پرفشار، و لامپ دیود نوری [۱].

گلخانه‌های تجاری با توجه به مصرف قابل توجه انرژی حرارتی و الکتریکی جزء صنایع انرژی بر طبقه‌بندی می‌شوند. به همین دلیل در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی در کنار نرخ تولید و رشد محصول باکیفیت در گلخانه‌ها اهمیت دو چندان یافته است.

یکی از روش‌های نوین تولید انرژی پاک و کاهش مصرف انرژی در گلخانه‌های امروزی، تبدیل گلخانه سنتی^۲ به خورشیدی^۳ از طریق به‌کارگیری پانل‌های فتوولتائیک^۴ (صفحات خورشیدی تولید الکتریسیته) قابل نصب روی سقف گلخانه بوده که در واقع یکی از شاخه‌های علم جدید کشاورزی خورشیدی^۵ است.

علم کشاورزی خورشیدی نوعی کاربری دوگانه از مساحت در دسترس برای تولید همزمان برق خورشیدی و محصولات کشاورزی است [۲]. مزیت عمده این روش تولید همزمان برق و محصول بدون نیاز به افزایش مساحت کشت بوده، که البته این امر نیازمند مطالعه جامع اثرات سایه‌اندازی پانل‌ها بر کیفیت محصول تولیدی، نرخ تولید انرژی و سایر پارامترهای تعیین‌کننده رشد گیاه در محل کشت است.

فناوری کشاورزی خورشیدی ابتدا توسط گوتزبرگر و زاسترو در سال ۱۹۸۲ ارائه شد [۳]. این روش جدید به‌کار رفته در کشاورزی دارای سه تقسیم‌بندی اصلی بوده که عبارتند از (شکل ۱):
 (۱): نصب صفحات خورشیدی با فاصله از محصولات در مزارع، صفحات خورشیدی نصب شده در بالای محصولات، و پانل‌های خورشیدی گلخانه‌ای. هر سه روش فوق دارای متغیرهایی

⁴ Photovoltaic Panel (PV)

⁵ Agrivoltaics, Agrisolar, or Dual-Use Solar

¹ LED: Light Emitting Diode

² Traditional Greenhouse

³ Solar Greenhouse or Photovoltaic Greenhouse (PVG)

اصولاً در گلخانه‌های خورشیدی، محدودیت اصلی میزان جذب نور محصول است و در شرایطی که نور دریافتی گیاه از میزان نور مورد نیاز کمتر شود، کیفیت محصول افت خواهد کرد.

در شکل (۲) سه نوع اصلی نصب پانل‌های فتوولتائیک نشان داده شده است. روش اول پرکاربردترین و کم هزینه‌ترین روش نصب می‌باشد؛ اما توجه به نرخ جذب نور محصول بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۲ روش‌های اصلی نصب پانل فتوولتائیک برای گلخانه خورشیدی؛ الف- نصب پانل به صورت ثابت بر روی سقف [۷]، ب- نصب به صورت دینامیکی و متحرک [۸]، ج- پانل‌های جدید ابداعی با قابلیت عبور نور [۹]

نماید. در واقع این نسبت سایه‌ای را فراهم می‌کند که با کشت گلخانه‌ای سازگار است.

در سال ۲۰۲۰، تحقیقی توسط لی و همکاران [۱۲] برای امکان‌سنجی نصب صفحات خورشیدی دینامیکی روی سقف یک گلخانه بر تولید همزمان برق و محصول انجام شد. نتایج نشان داد در روزهای ابری که نرخ تولید برق صفحات تا حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد، می‌توان با تنظیم زاویه پانل‌های PV، تولید برق و نور مورد نیاز محصول را به حد مجاز افزایش داد. تولدو و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۱، به ارزیابی توصیفی روش‌ها و چیدمان‌های گوناگون نصب صفحات خورشیدی در سقف گلخانه پرداختند.

بررسی تحقیقات مختلف نشان داد ماژول‌های PV غیرشفاف (مات) معمولی قابلیت ایجاد سایه داشته و در نتیجه به‌طور قابل توجهی بر شرایط داخل گلخانه (دمای هوا، رطوبت نسبی، سطح نور و غلظت دی‌اکسید کربن) و بهره‌وری تأثیر می‌گذارند. برای به حداقل رساندن این اثر، یک رویکرد استفاده از ماژول‌های PV نیمه‌مات جزئی^۱ یا کاملاً شفاف با قابلیت تولید برق است. در صورت به‌کارگیری پانل‌های مات، تابش خورشیدی به‌طور غیر یکنواخت توزیع می‌شود که به‌صورت فصلی متفاوت است. در نتیجه، یافتن چیدمان بهینه از ماژول‌های PV در سقف گلخانه به‌منظور تعریف شرایط بهینه برای کشت گیاه ضروری است. به‌عنوان مثال، چیدمان شطرنجی یکنواختی بهتری را نشان داده و در نتیجه اثرات سایه‌زنی پانل‌های فتوولتائیک را کاهش داده است.

در سال ۲۰۱۸، بلاندو و همکاران [۱۰] برای اولین بار به بررسی رشد برخی از گونه‌های توت داخل گلخانه خورشیدی و با سطح سایه متفاوت در مقایسه با گلخانه سنتی پرداختند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که گلخانه با نرخ پوشش ۱۰۰ درصد نیز می‌تواند تحت شرایطی برای کشت برخی محصولات مقاوم در برابر سایه مانند گونه‌های توت مورد استفاده قرار گیرند. این بررسی تأیید می‌کند که محدودیت درصد سایه‌اندازی در گلخانه‌ها می‌بایست بر اساس محیط جغرافیایی کشت، نوع محصول و ساختار گلخانه به دقت مورد بررسی قرار گیرد. به عبارت دیگر امکان لحاظ کردن یک درصد بهینه پوشش گلخانه برای تمامی محصولات و اقلیم‌ها وجود ندارد و نیاز است تا برای هر یک به‌صورت مجزا تحقیقات مربوطه انجام شود.

مطالعه جامعی توسط مارکو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰ با تمرکز بر نصب پانل‌های PV بر عملکرد ۱۴ محصول باغی و گل‌کاری در چهار نوع گلخانه خورشیدی نصب شده در اروپا و با نسبت پوشش بین ۲۵ تا ۱۰۰ درصد انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که همه گونه‌های در نظر گرفته شده از جمله محصولات باغی که نیاز به نور زیاد دارند را می‌توان در داخل گلخانه‌های خورشیدی با نسبت پوشش ۲۵ درصد کشت کرد. اما محدودیت در رشد و عملکرد هنگامی برای این محصولات رخ داد که نسبت پوشش از حداقل ۵۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش یافت. مطالعات بیشتر نیز با طرح‌بندی‌ها و چیدمان‌های متنوع PV در هندسه‌های سقف و نسبت‌های پوشش متفاوت، تأیید می‌کند که نسبت چگالی نسبی ماژول‌های PV مات نباید از ۵۰ درصد تجاوز

¹ Partial or Semi Opaque PV

ایجاد شده توسط دیوار ارائه داد. بیشترین اثر کاهش تشعشع مستقیم و پراکنده فرودی در گوشه‌های گلخانه مشاهده شد.

جدول (۱) خلاصه‌ای از نتایج محققان مختلف طی سال‌های اخیر را بر روی درصد پوشش مجاز گلخانه‌های خورشیدی بر اساس محصول تولیدی و موقعیت جغرافیایی نصب گلخانه ارائه داده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده و اهمیت به‌کارگیری علم کشاورزی خورشیدی در صنایع گلخانه‌ای، هدف از پژوهش حاضر مطالعه و بررسی تأثیر درصد پوشش سقف یک گلخانه نمونه در شهر تهران با پانل‌های فتوولتائیک بر ضریب سایه‌اندازی داخل فضای گلخانه و همچنین میزان تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر می‌باشد. با توجه به اثرات نامطلوب سایه‌اندازی بیش از حد بر کیفیت و کمیت محصول تولیدی گلخانه، یافتن نرخ بهینه پوشش سقف گلخانه‌ها بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

تغییرات روزانه سطح سایه در یک گلخانه خورشیدی ۴۵۰ متر مربعی تولید گوجه‌فرنگی در فصل زمستان به‌صورت تجربی و عددی توسط ژانگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۳ مورد مطالعه قرار گرفت. میزان سایه ایجاد شده روی کف گلخانه بطور میانگین حدود ۲۰ درصد مساحت گلخانه گزارش شد که به‌صورت سهموی با زمان در طول روز تغییر می‌کند.

در سال ۲۰۲۳، فررا و همکاران [۱۴] به مطالعه تأثیر سایه‌اندازی ایجادشده توسط پانل‌های PV نصب شده بالای درخت انگور در ایتالیا بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ پرداختند. یافته‌های تحقیق نشان داد که پانل‌های فتوولتائیک حداکثر دمای هوا و خاک را ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد کاهش دادند. از سوی دیگر نصب پانل‌ها بر ریزاقلیم و فیزیولوژی درخت انگور تأثیر گذاشته و کاهش کیفیت محصول مشاهده می‌شود.

دنگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۱۵] مدل جدیدی به‌منظور محاسبه توزیع تشعشع خورشیدی داخل گلخانه تحت تأثیر سایه

جدول ۱ بررسی میزان استاندارد پوشش سقف گلخانه خورشیدی با سلول PV مات بدون افت نوردهی مورد نیاز محصول

نوع محصول	موقعیت جغرافیایی	درصد پوشش	درصد مجاز پوشش	پارامتر DLI میانگین ماهانه در طول یکسال			پارامتر DLI مورد نیاز محصول		
				حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	بهینه	حداکثر
بلک بری	جنوب ایتالیا [۱۰]	٪۳۲	٪۴۰	۱۳/۲	۳۳/۷	۵۳/۲	۱۱	۲۱	۳۰
توت فرنگی	چین، استان یون نان [۱۶]	٪۲۶	٪۳۰	۲۳/۴	۳۴/۸	۴۶/۴	۱۰	۲۰	۲۵
فلفل	یونان [۱۷]	٪۲۲	٪۴۵	۱۵/۹	۳۲/۶	۵۵/۷	۱۲	۲۰	۳۰
کاهو	جنوب غربی یونان [۱۸]	٪۲۰	٪۷۰	۱۴/۸	۳۲/۳	۵۶/۶	۶/۵	۹	۱۲
انواع گل	شمال شرقی ایتالیا [۱۹]	٪۲۰	٪۸۰	۱۹/۱	۳۲/۵	۴۷/۸	۴	۶	۱۰
گوجه فرنگی	چین، استان یون نان [۲۰]	٪۲۰	٪۴۰	۲۳/۴	۳۴/۸	۴۶/۴	۲۱	۲۵	۳۰

۲- پارامترهای تعیین‌کننده نور مورد نیاز گیاه

فوتون فتوسنتزی^۱ و نرخ انتگرال نور روزانه^۲ شناخته می‌شوند؛ اما پیش از معرفی پارامترهای ذکر شده، نیاز است تا پارامتر توزیع توان طیفی^۳ تعریف شود. در علم نورسنجی، پارامتر SPD به‌عنوان توان در واحد سطح در واحد طول موج یک روشنایی تعریف می‌شود که واحد آن برابر با $W/m^2.nm$ است. به‌طور کلی‌تر، اصطلاح توزیع توان طیفی می‌تواند به غلظت، به‌عنوان تابعی از طول موج هر کمیت رادیومتری یا فتومتریک بیان شود. کمیسیون بین‌المللی روشنایی که به اختصار با نام فرانسوی CIE^۴ شناخته می‌شود پارامتر SPD را برای منابع مختلف نوری تعریف کرده است. در همین راستا، پارامترهای A، B و C در

به‌منظور مطالعه دقیق اثرات پوشش سقف گلخانه بر نوردهی مورد نیاز محصول، ابتدا باید پارامترهای کمی و کیفی مؤثر بر نور محصول شناسایی و معرفی شوند. کمیت، کیفیت و مدت زمان تابش نور، سه پارامتر اساسی تنظیم‌کننده رشد گیاه هستند. گیاهی که کیفیت نور مناسبی دریافت نمی‌کند ممکن است تفاوت‌های فیزیولوژیکی را در مقایسه با گیاهان مشابهی که در شرایط نوری مطلوب رشد می‌کنند، نشان دهد. دو پارامتر اصلی تعیین‌کننده کمیت نور مورد نیاز گیاه تحت عنوان چگالی شار

³ SPD: Spectral Power Distribution

⁴ CIE: The International Commission on Illumination

¹ PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density

² DLI: Daily Light Integral

تعریف شده، ضریب دیگری تحت عنوان فاکتور نور روز^۱ نیز معرفی شود. این فاکتور به صورت نسبت میزان روشنایی دریافتی در یک صفحه کاری فرضی داخل فضا به روشنایی طبیعی دریافتی یک صفحه افقی در محیط بیرون بدون مانع تعریف می شود. در محاسبه پارامتر DF، هر دو مقدار روشنایی مستقیم و غیرمستقیم جذب شده توسط صفحه کاری باید در نظر گرفته شود [۲۴].

$$DF (\%) = \frac{I_{in}}{I_{out}} \times 100 \quad (2)$$

پارامتر ضریب نوردهی میانگین^۲ (ADF) تعریف دیگری از پارامتر DF بوده که میانگین ضریب نور را برای تمامی فضای یک صفحه کاری و در طول کل یک شبانه روز بدست می آورد. این پارامتر با توجه به نیاز به ارزیابی ماهیت نوردهی مورد نیاز گیاه به صورت روزانه، بسیار حائز اهمیت است. فاکتور سایه اندازی^۳ با توجه به تعریف ضریب DF به صورت زیر تعریف می شود. این فاکتور بیانگر درصد کاهش جذب نور در یک سطح کاری ناشی از عامل سایه اندازی می باشد.

$$S_f (\%) = 100 - ADF \quad (3)$$

علاوه بر پارامترهای کمی مؤثر بر نور گیاه، فاکتورهای کیفی نیز باید مورد مطالعه قرار گیرد تا محصول در شرایط مساعد رشد نماید. کیفیت نور فرودی به توزیع طیفی نور داده شده به گیاه اشاره دارد که از طریق دو پارامتر تابش فعال فتوسنتزی^۴ و پریدوسم نوری معرفی می شود.

پارامتر تابش فعال فتوسنتزی (PAR) محدوده طیفی تابش خورشیدی را از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر مشخص می کند، که با محدوده طیفی مورد نیاز گیاهان برای فرآیند فتوسنتز مطابقت دارد [۱].

به منظور درک بهتر تفاوت پارامتر PAR و Lumen، شکل (۴) که نشان دهنده حساسیت چشم انسان (بر اساس لومن) نسبت به حساسیت گیاه در جذب نور (پارامتر PAR) برای فرآیند فتوسنتز می باشد، ارائه شده است. حساسیت چشم انسان در محدوده طول موج مرئی، بیشتر متمایل به طیف رنگی سبز و زرد است؛ اما این موضوع در خصوص گیاهان در محدوده طیف رنگی قرمز (۶۴۰ تا ۶۸۰ نانومتر) قرار می گیرد.

سال ۱۹۳۱ معرفی شدند که به ترتیب نشان دهنده نور رشته‌ای متوسط، نور مستقیم خورشید و متوسط نور روز بودند [۲۱]. در شکل (۳) پارامتر توزیع نسبی توان طیفی (SPD) نور طبیعی و چندین نمونه لامپ روشنایی از ۳۸۰ نانومتر تا ۷۸۰ نانومتر نشان داده شده است.

کمیت نور محصول به میزان نوری که یک گیاه در هر روز برای رشد مطلوب نیاز دارد اشاره می کند. کمیت نور مورد استفاده در محاسبات انرژی و یا نور دریافتی چشم انسان به ترتیب برحسب وات بر مترمربع و لوکس تعریف می شود. این در حالی است که واحدهای اشاره شده برای بررسی کمیت نور مورد نیاز گیاه چندان مفید نیستند. لذا دانشمندان علم گیاه‌شناسی از واحد جدیدی تحت عنوان چگالی شار فوتون فتوسنتزی برای اندازه‌گیری کمیت نور گیاهان بهره می برند که واحد آن میکرومول بر مترمربع-ثانیه است. پارامتر PPFD یک روش اندازه‌گیری صریح از مقدار فوتون‌هایی است که در هر متر مربع در ثانیه به سطح برخورد می کنند، که روشی دقیق تر برای اندازه‌گیری نحوه تعامل گیاهان با فوتون است.

یکی از مهم ترین پارامترهای شناسایی نور مورد نیاز گیاه که از محاسبه پارامتر PPFD حاصل می شود، به عنوان نرخ انتگرال نور روزانه یا DLI تعریف می گردد. پارامتر DLI بیانگر چگالی کل نور دریافتی یا مورد نیاز گیاه در طول یک شبانه روز است که واحد آن مول بر مترمربع-روز بوده و از طریق معادله (۱) (با فرض ثابت بودن نرخ روزانه PPFD) محاسبه می شود [۲۲]:

$$DLI = 0.0036 \times PPFD \times h \quad (1)$$

به طور کلی نیاز به نور برای یک محصول خاص در محصولاتی که تولید میوه داشته و گلدار هستند بیشتر بوده و برای محصولاتی که به صورت گیاه باقی می ماند کمتر است. سبزی‌های برگ‌دار مانند کاهو، اسفناج و کلم پیچ معمولاً محصولاتی با نور کم در نظر گرفته می شوند که به نرخ DLI حدود ۱۲ تا ۱۷ مول بر مترمربع-روز نیاز دارند. گوجه‌فرنگی، خیار و فلفل به پارامتر DLI بین ۲۰ تا ۳۰ مول بر مترمربع-روز نیاز دارند. شاهدانه یکی از بالاترین نیازهای نوری گیاهان کشت شده را دارد که به DLI حداکثر ۴۰ مول بر مترمربع-روز نیاز دارد [۲۳].

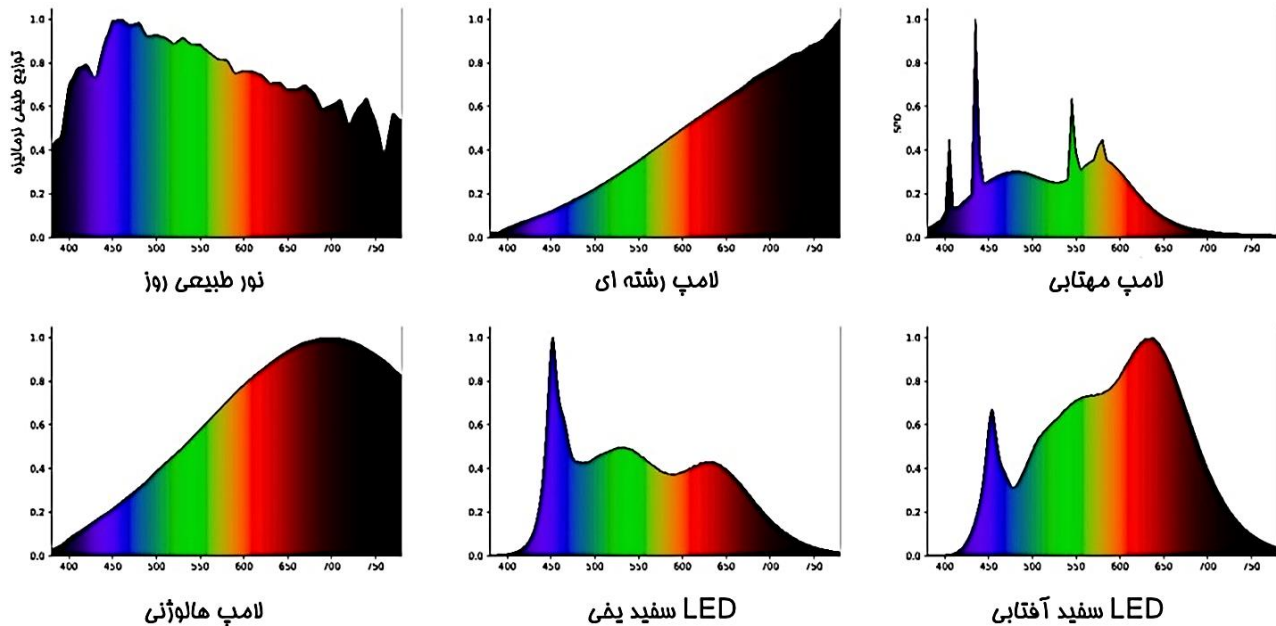
به منظور بررسی میانگین درصد سایه‌اندازی پانل‌های فتوولتائیک به داخل گلخانه، نیاز است تا علاوه بر دو پارامتر اصلی

³ Shading Factor (S_f)

⁴ PAR: Photosynthetically Active Radiation

¹ Daylight Factor (DF)

² Average Daylight Factor (ADF)

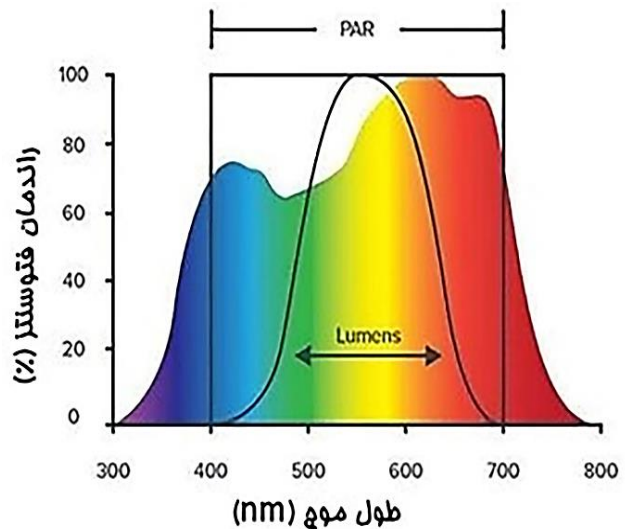


شکل ۳ توزیع نسبی توان طیفی (SPD) نور طبیعی و لامپهای مختلف از ۳۸۰ نانومتر تا ۷۸۰ نانومتر [۲۱]

در نظر گرفته شده است. سایر اطلاعات مربوطه به شرح جدول (۲) می باشد.

جدول ۲ مشخصات گلخانه نمونه مدل سازی شده

مشخصات کمی	عنوان
۱۰ متر (طول)، ۶ متر (عرض)، ۴ متر (ارتفاع تاج)	ابعاد
۲۱۰ مترمکعب	حجم
۲۰ درجه	شیب سقف
ورق پلی کربنات شفاف دو جداره ۸ میلیمتری	مشخصات
ضریب گذر نور: ۰.۷۴	پوشش
ضریب انتقال حرارت ^۶ (U-Value-W/m ² -K): ۲/۱۸	موقعیت
شهر تهران (طول جغرافیایی: ۵۱/۳۲ درجه شرقی، عرض جغرافیایی: ۳۵/۶۸ درجه شمالی، ارتفاع از سطح دریا: ۱۱۹۱ متر)	نصب



شکل ۴ منحنی تغییرات راندمان پارامتر PAR و Lumen بر حسب طول موج

۳- تعریف مسئله نمونه

محصول تولیدی گلخانه نمونه، خیار یا گوجه فرنگی در نظر گرفته شده است که نرخ بهینه پارامتر DLI آنها در حدود ۱۵ مول بر مترمربع-روز می باشد. همچنین نوع پوشش سایه اندازی سقف گلخانه، با پانل فتوولتائیک مونوکریستال مات^۷ بوده که راندمان تقریبی آن ۱۹ درصد می باشد.

به منظور شبیه سازی دینامیکی نوردهی^۱، یک گلخانه نمونه تک دهانه ای^۲ با سقف شیب دار^۳ واقع در شهر تهران در نظر گرفته شده است. موقعیت نصب گلخانه به صورت شرقی - غربی بوده، پوشش خارجی آن از جنس صفحات دو لایه پلی کربنات شفاف^۴ به ضخامت ۸ میلیمتر و همچنین سازه اصلی گلخانه از نوع فلزی

⁵ Visible Light Transmittance (VT or VLT)

⁶ Overall Heat Transfer Coefficient

⁷ Opaque (Blind-Type)

¹ Daylighting

² Single Span

³ Gable Roof

⁴ Clear Polycarbonate Twin-Wall Sheet

۴- تحلیل مسئله نمونه و بررسی نتایج

توسط انواع منابع نوری مصنوعی بدست آمده و با نرخ تولید الکتریسیته توسط پانل‌های فتوولتائیک مقایسه شده است. فاکتور نوردهی میانگین در این روش از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود و با اعمال آن در رابطه (۳) ضریب سایه‌اندازی بدست می‌آید.

$$\text{ADF} (\%) = \text{DLI}_{\text{in}} / \text{DLI}_{\text{out}} \times 100 = \text{VLT}_{\text{ev}} - \text{CR} / 100 \times (\text{VLT}_{\text{ev}} - \text{VLT}_{\text{pv}}) \quad (4)$$

در شرایطی که پانل فتوولتائیک نصب شده در سقف گلخانه از نوع کاملاً مات لحاظ شود، پارامتر VLT_{pv} برابر با صفر خواهد بود و رابطه (۴) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\text{ADF} (\%) = \text{VLT}_{\text{ev}} (1 - \text{CR} / 100) \quad (5)$$

مقادیر فاکتور ADF و ضریب سایه‌اندازی بر اساس رابطه (۵) برای حالات مختلف نرخ پوشش ۰، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ درصد و با ضریب گذر نور تعریف شده در جدول (۲) محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ محاسبه فاکتور ADF و ضریب سایه‌اندازی از روش تقریبی برای درصد پوشش‌های مختلف

فاکتور سایه‌اندازی ($S_f\%$)	فاکتور ADF (%)	درصد پوشش سقف گلخانه (% CR)
۲۶	۷۴	۰
۳۳/۴	۶۶/۶	۱۰
۴۴/۵	۵۵/۵	۲۵
۶۳	۳۷	۵۰
۱۰۰	۰	۱۰۰

شکل (۵) نرخ تغییرات ماهانه تابش خورشیدی شهر تهران را مطابق با داده‌های منتشر شده توسط بانک اطلاعاتی اطلس جهانی خورشیدی^۱ نشان می‌دهد. طول روز برای تهران از ۹/۸ ساعت تا حدود ۱۴/۴ ساعت در سال در حال تغییر است. بیشترین شدت تابش ماهانه برای شهر تهران در ماه‌های ژوئن (اوایل خرداد) تا اوت (اوایل شهریور) با زاویه تابش خورشیدی ۷۸ درجه نسبت به افق رخ می‌دهد که به طور میانگین برابر با ۱۷۰ کیلووات ساعت بر متر مربع است. در مقابل، کمترین شدت تابش مربوط به ماه‌های دسامبر و ژانویه (اواسط آذر تا دی) بوده با زاویه تابش ۳۱ درجه نسبت به افق بوده که تا ۵۵ کیلووات ساعت بر متر مربع کاهش را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، تحلیل و بررسی اثرات سایه‌اندازی پانل‌های فتوولتائیک در سقف گلخانه خورشیدی نمونه با دو روش مختلف محاسبه گردیده است.

در روش اول که به روش تقریبی (تخمینی) شناخته می‌شود، فاکتور نوردهی داخل گلخانه و به طبع آن نرخ سایه‌اندازی از روابط تخمینی که به ضریب گذر نور پوشش گلخانه مرتبط است بدست می‌آید. سپس با استفاده از ضریب بدست آمده و محاسبه پارامتر DLI بیرونی برای اقلیم محل نصب گلخانه با یکی از روش‌های مرسوم مانند نرم‌افزار آنلاین Global DLI App (این نرم‌افزار داده‌ها را از سایت Nasa Power بخش نرخ تشعشع خورشیدی جهانی دریافت می‌کند [۲۵]) یا روش تخمینی ارائه شده در نشریه ۴۷۴ وزارت جهاد کشاورزی [۲۶]، میزان DLI درون گلخانه در درصد‌های مختلف پوشش سقف با پانل‌های PV محاسبه می‌گردد.

روش دوم (روش دقیق) محاسبه پارامتر DLI داخل گلخانه با به‌کارگیری ماژول Daylighting نرم‌افزار Design Builder انجام شده است. در این روش، مدل سه بعدی گلخانه به همراه تمامی مشخصات پوسته و سازه گلخانه در نرم‌افزار مربوطه مدل گردید، سپس اطلاعات نرخ نور لحظه‌ای داخل گلخانه برای روزهای مختلف سال استخراج شده و در نهایت داده‌های نوردهی یک شبانه روز کامل برای هر روز سال محاسبه و گزارش شد.

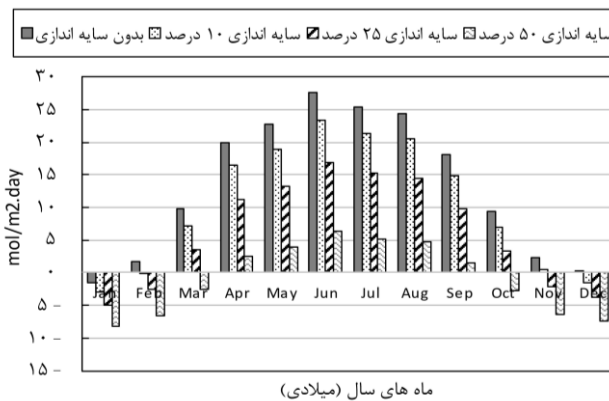
۴-۱- نتایج روش تقریبی

در روش تقریبی محاسبه فاکتور سایه‌اندازی و ضریب نوردهی میانگین، درصد نوردهی روزانه به یک صفحه افقی فرضی داخل گلخانه تنها بر اساس پارامترهای ضریب گذر نور از پوشش گلخانه و درصد پوشش عامل سایه‌اندازی (که در این تحقیق پانل‌های فتوولتائیک روی سقف می‌باشد) محاسبه می‌گردد. پس از استخراج فاکتور نوردهی میانگین، مقادیر سالانه DLI از روابط نشریه ۴۷۴ سازمان برنامه و بودجه کشور و یا نرم‌افزار آنلاین Global DLI App استخراج گردید. سپس میزان DLI داخل گلخانه برای درصد پوشش‌های مختلف صفر، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد پانل فتوولتائیک نصب شده در سقف محاسبه شده و با مقدار بهینه DLI محصول برای رشد مناسب مقایسه شده است. مقدار DLI بهینه محصول در این تحقیق برابر با ۱۵ مول بر مترمربع روزانه لحاظ شده است. در نهایت کمبود نور طبیعی مورد نیاز

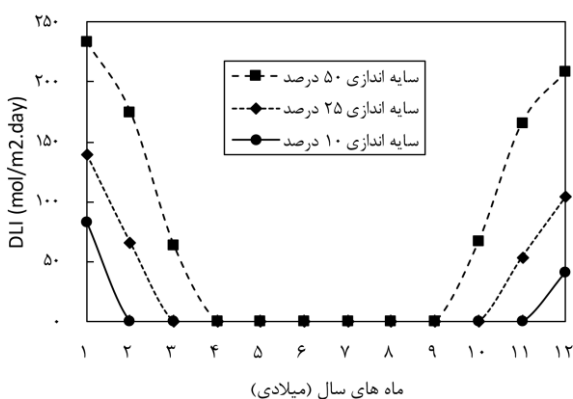
¹ Global Solar Atlas

شکل (۷) نتایج حاصل از کسری و یا مازاد نور داخل گلخانه را طی ماه‌های مختلف یکسال با توجه به درصد پوشش پانل‌های PV در سقف نشان می‌دهد. ماه‌هایی که مقدار مابه‌التفاوت DLI در آنها منفی شده است، نیازمند تأمین نور مصنوعی توسط لامپ می‌باشند. در شرایط بدون پوشش سقف، تنها در ماه‌های ژانویه و دسامبر به نور مصنوعی نیاز است؛ اما با درصد پوشش ۵۰، از ماه اکتبر تا مارس باید از نور مصنوعی استفاده شود.

محاسبه شدت نور مصنوعی مورد نیاز گلخانه با توجه به اختلاف دو عامل میزان نور طبیعی در دسترس داخل گلخانه و مقدار نور مورد نیاز گیاه بدست می‌آید. به‌منظور محاسبه تعداد و توان لامپ‌های مورد نیاز گلخانه، پارامتر PPFd طبق رابطه (۱) بر اساس مقدار کمبود DLI محاسبه می‌شود.

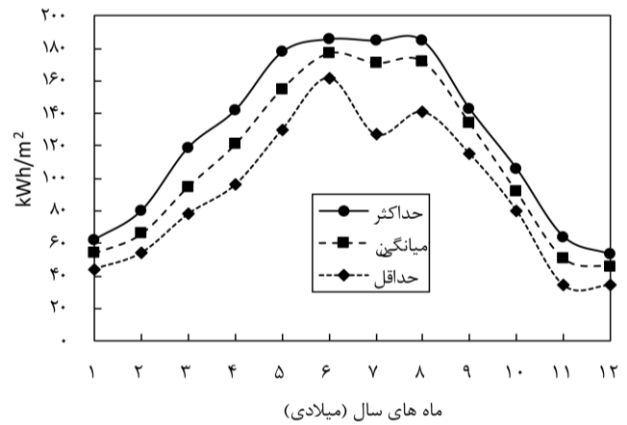


شکل ۷ میزان مازاد/کسری DLI داخل گلخانه برحسب پوشش سقف گلخانه در یکسال در شهر تهران برای درصدهای مختلف



شکل ۸ میزان کسری PPFd داخل گلخانه برحسب $\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}$ طی یکسال در تهران برای درصدهای سایه‌اندازی ۱۰، ۲۵ و ۵۰

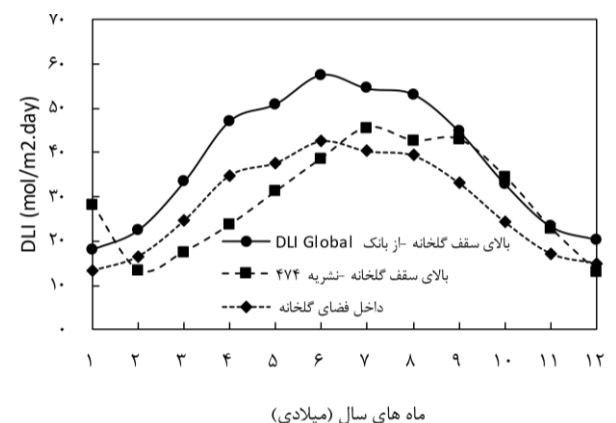
شکل (۸) نتایج محاسبه پارامتر PPFd با توجه به میزان پوشش سقف ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد و بر اساس مقدار DLI منفی ارائه شده در شکل (۷) نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، حداکثر PPFd مورد نیاز در صورت پوشش ۵۰ درصد سقف، در ماه



شکل ۵ میانگین تشعشع فرودی ماهانه برحسب kWh/m^2 طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ در شهر تهران

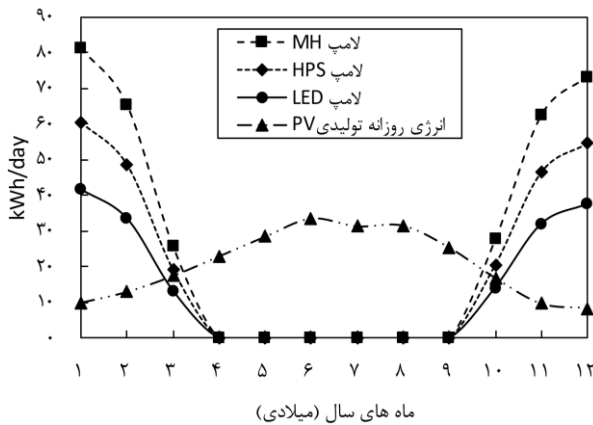
شکل (۶) نیز مقدار پارامتر DLI در بالای سقف گلخانه و عبوری به داخل گلخانه در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد که از طریق دو روش محاسباتی نشریه ۴۷۴ سازمان برنامه و بودجه و نرم‌افزار آنلاین Global DLI App استخراج شده است. همانطور که مشخص است، حداکثر نرخ DLI داخل گلخانه در ماه ژوئن برابر با ۴۰ مول بر مترمربع است، که برای رشد محصول گلخانه‌ای با DLI حدودی ۱۵ مطلوب است؛ اما در صورتی که تولید محصول در ماه‌های ژانویه یا دسامبر مد نظر باشد، نرخ DLI به میزان ۱۳ کاهش یافته که بیانگر این حقیقت است که نور طبیعی خورشید جوابگوی رشد مطلوب محصول نبوده و نیاز است تا کمبود نور توسط لامپ‌های تولید نور مصنوعی فتوسنتزی تأمین شود و یا دوره رشد محصول افزایش یابد.

از سوی دیگر، نتایج پارامتر DLI بدست آمده از روابط نشریه ۴۷۴ نشان می‌دهد بجز ماه‌های سپتامبر تا نوامبر، در بقیه ماه‌های سال خطای ۳۰ الی ۴۰ درصدی با داده‌های واقعی وجود دارد که خطای قابل توجهی بوده و لذا استفاده از آن توصیه نمی‌شود.



شکل ۶ تغییرات میانگین ماهانه پارامتر DLI برحسب $\text{mol}/\text{m}^2.\text{day}$ طی یکسال در شهر تهران

مصرف برق بسیار بالا نسبت به تولید برق خورشیدی بوده و توجه فنی و اقتصادی نخواهد داشت.



شکل ۹ مقایسه انرژی تولیدی پانل PV و میزان روزانه توان لامپ مورد نیاز برحسب کیلووات ساعت به منظور جبران کمبود نور داخل گلخانه در نرخ سایه‌اندازی ۵۰ درصد برای سه نوع لامپ متال هالید (MH)، بخار سدیم (HPS)، و LED

۴-۲- نتایج روش شبیه‌سازی

نقطه ضعف اصلی روش ارائه‌شده قبلی، عدم امکان ارزیابی توزیع نور حاصل از پوشش سقف گلخانه می‌باشد. زیرا در روش تقریبی هندسه سقف، تغییرات سایه‌اندازی زیر سقف در طول شبانه‌روز و چیدمان‌های مختلف PV مورد مطالعه قرار نمی‌گیرد. در نتیجه، نتایج روش قبل با فرض توزیع میانگین نور و سایه در کل زیربنای گلخانه بوده که با خطای قابل توجهی به ویژه در برخی ماه‌های سال همراه خواهد بود. بروز این خطا ناشی از لحاظ کردن زاویه تابش نور به صورت کاملاً عمود بر سقف بوده و به عبارتی زاویه اوج^۱ خورشید برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. لذا برای بررسی دقیق نواقص روش اول، شبیه‌سازی نوردهی روزانه از طریق موتور محاسباتی رادیانس^۲ نرم‌افزار دیزاین بیلدر^۳ انجام گردید.

جدول ۴ مقایسه تولید انرژی سالانه پانل فتوولتائیک و انرژی مورد نیاز نور مصنوعی گلخانه نمونه با توجه به درصدهای مختلف پوشش سقف

انرژی سالانه مصرفی (kWh) / تعداد مورد نیاز لامپ نوع LED	انرژی سالانه مصرفی (kWh) / تعداد مورد نیاز لامپ نوع HPS	انرژی سالانه مصرفی (kWh) / تعداد مورد نیاز لامپ نوع MH	انرژی تولیدی سالانه توسط پانل PV برحسب kWh	درصد پوشش سقف گلخانه
۲ / ۴۶۸	۳ / ۶۸۲	۶ / ۹۱۵	۰	بدون پوشش
۷ / ۵۵۹۹	۱۱ / ۸۱۶۳	۲۱ / ۱۰۹۴۵	۷۵۹۸	پوشش ۵۰ درصد
۱۳ / ۲۷۰۰۰	۱۸ / ۳۹۳۸۴	۳۷ / ۵۲۷۸۲	۱۵۱۹۶	پوشش ۱۰۰ درصد

ژانویه و برابر با ۲۳۳ میکرومول بر مترمربع-ثانیه است. در حالی که همین پارامتر برای پوشش‌های ۲۵ و ۱۰ درصد، به ترتیب به میزان ۴۷ و ۲۲ درصد مقدار اعلامی با پوشش ۵۰ درصد می‌باشد. نکته مهم در انتخاب نور تکمیلی گلخانه، نوع لامپ انتخابی است. سه نوع از پرکاربردترین لامپ‌های گلخانه‌ای با محدوده PAR مطلوب برای گیاه که در محاسبات ارائه شده در شکل (۹) نیز استفاده شده است، عبارتند از:

- لامپ متال هالید MASTER HPI-T(400 W) با شدت PPF برابر با ۵۳۲ میکرومول بر ثانیه
- لامپ بخار سدیم MASTER SON- PIA Green Power (600 W) با شدت ۱۰۷۰ میکرومول بر ثانیه
- لامپ (600 W) Gravita LED با شدت PPF برابر با ۱۵۶۰ میکرومول بر ثانیه

لامپ LED در یک توان مصرفی یکسان مقدار شدت تشعشع فتوسنتزی به ترتیب در حدود ۴۵ و ۹۵ درصد بالاتر از لامپ بخار سدیم و متال هالید تولید می‌کند و راندمان مطلوب‌تری دارد. البته هزینه خرید لامپ LED نیز به مراتب بالاتر از لامپ‌های دیگر است.

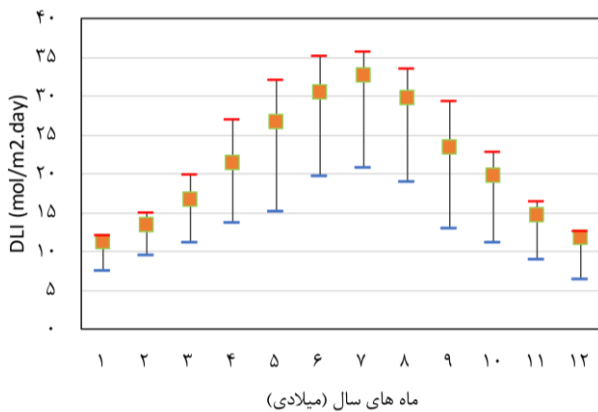
با فرض تولید محصول گلخانه‌ای در کل سال، محاسبات توان نور مصنوعی با به‌کارگیری لامپ‌های متفاوت انجام گردید که در جدول (۴) ارائه شده است.

از نتایج استنباط می‌شود که میزان انرژی سالانه مورد نیاز از طریق نور مصنوعی در شرایط بدون پوشش قابل توجه نبوده و قابل چشم‌پوشی است. در شرایط پوشش ۵۰ درصد، تولید انرژی سالانه تقریباً برابر با انرژی مورد نیاز لامپ بخار سدیم برای جبران نور است. در صورتی که به جای لامپ HPS از لامپ LED استفاده شود، انرژی سالانه تولیدی PV تقریباً ۳۵ درصد بیشتر از انرژی مورد نیاز لامپ‌ها خواهد بود که مطلوب است؛ اما در شرایط پوشش کامل سقف با پانل PV، انرژی مصرفی لامپ‌های LED، HPS، و MH در مقایسه با انرژی تولیدی پانل‌ها به ترتیب ۱/۸، ۲/۶ و ۳/۵ برابر بیشتر بوده که بیانگر نرخ

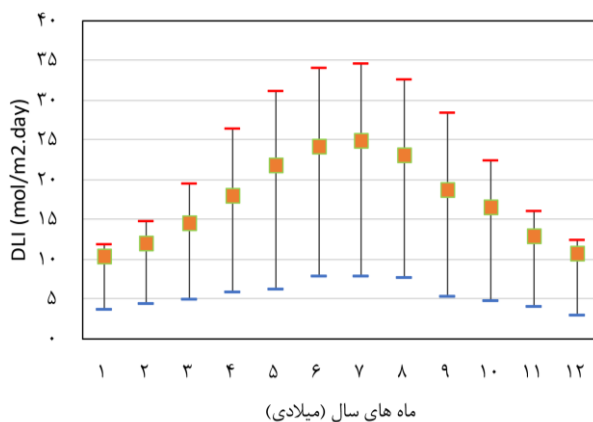
³ Design Builder Software

¹ Zenith Angle

² Radiance Illuminance Simulation



شکل ۱۱ تغییرات حداقل/میانگین/حداکثر ماهانه ضریب DLI داخل گلخانه بدون پوشش سقف



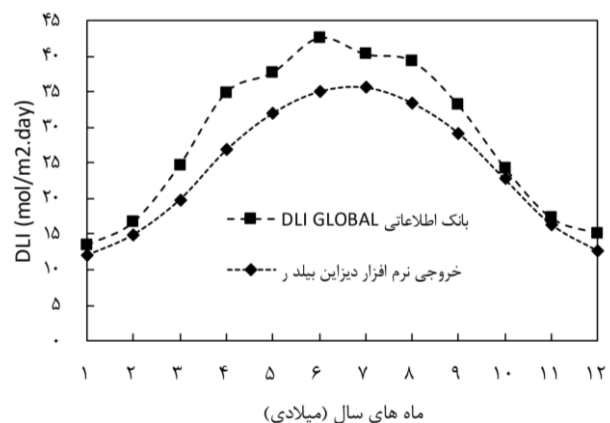
شکل ۱۲ تغییرات حداقل/میانگین/حداکثر ماهانه ضریب DLI داخل گلخانه با پوشش ۵۰ درصدی سقف جنوبی

به منظور مقایسه دقیق نحوه توزیع نور و اثرات سایه‌اندازی، کانتورهای نرخ DLI برای گلخانه نمونه در دو حالت بدون پوشش سقف و پوشش سقف جنوبی به میزان ۵۰ درصد (پوشش ۲۵ درصد کل سقف گلخانه) در شکل (۱۳) ارائه شده است. همچنین کانتورهای مرتبط با تمامی ماه‌های سال برای حالت دوم در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

نتایج بررسی کانتورهای مرتبط با گلخانه بدون پوشش در شکل (۱۳-الف) نشان می‌دهد که تغییرات پارامتر DLI در نقاط مختلف گلخانه بسیار اندک بوده و قابل چشم‌پوشی است. به عبارت دیگر، مقادیر میانگین DLI با مقادیر نقاط مختلف گلخانه تقریباً یکسان بوده و اختلافات اندک به وجود آمده نیز به دلیل سایه‌اندازی محدود ستون‌های فلزی گلخانه می‌باشد؛ اما این مسئله در خصوص حالت (ب) (با لحاظ کردن پوشش) کاملاً متفاوت است؛ به گونه‌ای که در ماه‌های سرد سال که زاویه اوج خورشید به بیشترین مقدار خود می‌رسد (ارتفاع خورشید نسبت

فرضیات شبیه‌سازی به شرح زیر است:

- ارتفاع صفحه کاری برداشت داده‌های نوری لحظه‌ای از کف گلخانه: ۷۵ سانتیمتر (محل حدودی کشت محصول)
 - نوع مدل آسمان: صاف آفتابی استاندارد^۱
 - ابعاد شبکه‌بندی سطح: مربع ۳۰ سانتیمتری
- در شکل (۱۰) مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی با خروجی نرم‌افزار ارائه شده است. بررسی شکل مذکور نشان می‌دهد که در ماه‌های سرد و معتدل سال، نتایج خروجی نرم‌افزار حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد کمتر از داده‌های تجربی است؛ اما در ماه‌های گرم سال این اختلاف بین ۲۵ تا ۳۰ درصد می‌رسد. از دلایل این اختلاف می‌توان به نوع مدل آسمان انتخابی در نرم‌افزار، و تغییرات زاویه ورود نور به داخل فضای گلخانه اشاره نمود.



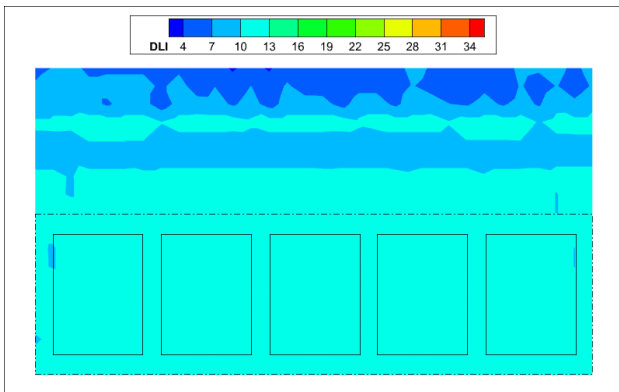
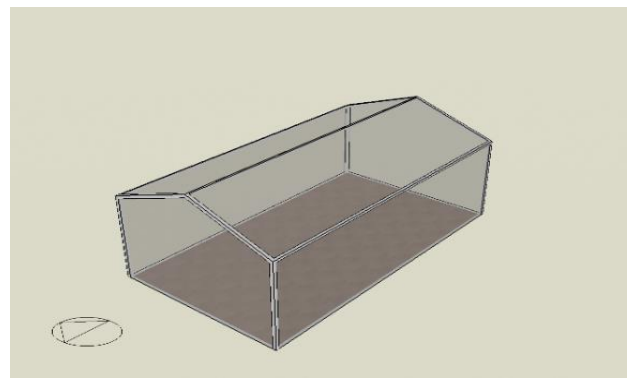
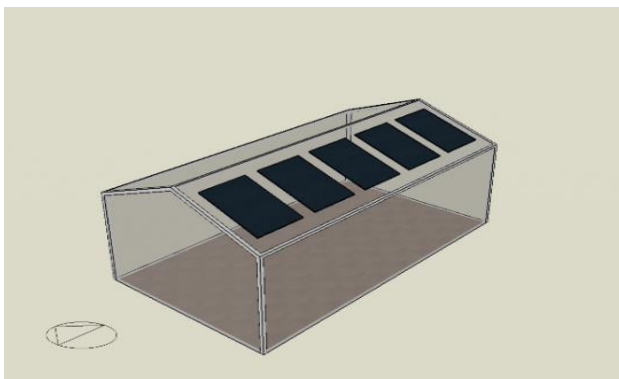
شکل ۱۰ مقایسه تغییرات ماهانه پارامتر DLI داخل گلخانه، بین داده‌های DLI Global با خروجی نرم‌افزار دیزاین بیلدر

یکی از نتایج مهم دیگری که از شبیه‌سازی حاصل می‌شود، بررسی تغییرات پارامتر DLI داخل گلخانه با پوشش‌های مختلف سقف است. در حالت اول نتایج برای گلخانه نمونه بدون هیچ گونه پوششی استخراج گردید (شکل ۱۱). در شرایط بدون پوشش، اختلاف اندکی بین مقدار میانگین با حداکثر وجود دارد که از ۵ تا ۱۵ درصد در ماه‌های مختلف در حال تغییر است. این در حالی است که در شرایط پوشش ۲۵ درصد سقف (۵۰ درصد پوشش سقف جنوبی با پانل فتوولتائیک/سقف شمالی بدون پوشش)، اختلاف مقدار میانگین و میزان حداکثر DLI به دلیل وجود اثر سایه‌اندازی افزایش یافته و از ۱۱ تا ۳۴ درصد تغییر می‌کند. همانطور که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، حداکثر اختلاف میانگین با حداکثر، در پوشش ۲۵ درصد سقف جنوبی در ماه‌های گرم سال (به‌ویژه ماه سپتامبر) رخ داده که زاویه تابش نور خورشید نسبت به زمین در عمودی‌ترین حالت ممکن بوده و باعث حداکثر سایه‌اندازی داخل گلخانه می‌شود.

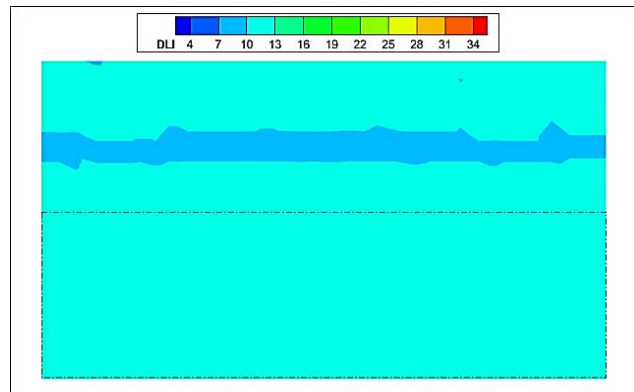
^۱ CIE Sunny Clear Day – Standard Sky

لامپ‌ها در اختیار قرار دهد. به‌عنوان نمونه با توجه به محل سایه‌اندازی در ماه‌های مختلف، لامپ‌های نوری می‌بایست در فضاهای مرکزی گلخانه نصب شوند و در ۲ متر ابتدایی و انتهایی طول گلخانه نیازی به نصب لامپ نمی‌باشد. از سوی دیگر، حداکثر مقدار PPFD مورد نیاز لامپ که در ماه‌های سرد سال با طول روز کم رخ می‌دهد، مطابق نتایج توزیع نور طبیعی در حدود ۲۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بوده که معیار دقیقی برای انتخاب نوع لامپ است.

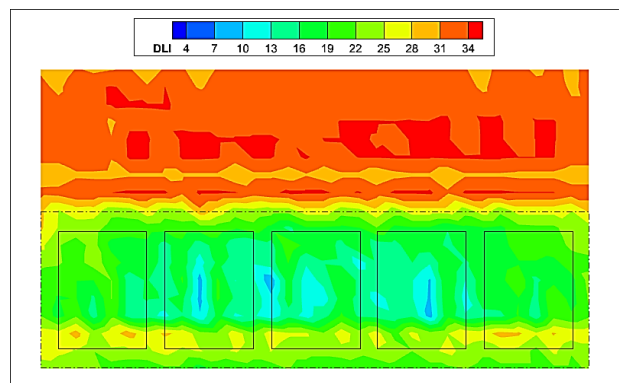
به آسمان پایین‌تر است)، سایه ایجاد شده ناشی از پوشش سقف گلخانه عمدتاً در بخش شمالی رخ می‌دهد و همچنین اختلاف مقدار میانگین و حداکثر محدود است؛ اما در ماه‌های گرم سال با زاویه اوج خورشیدی کم، سایه ایجاد شده دقیقاً زیر موقعیت پانل‌های نصب شده در سقف ایجاد شده و از سوی دیگر، اختلاف قابل توجهی مابین نقاط حداکثر، میانگین و حداقل وجود دارد. مطالعه دقیق کانتورهای شکل (۱۴) می‌تواند نتایج ارزشمندی را از ظرفیت طراحی منبع نور مصنوعی مورد نیاز و موقعیت نصب



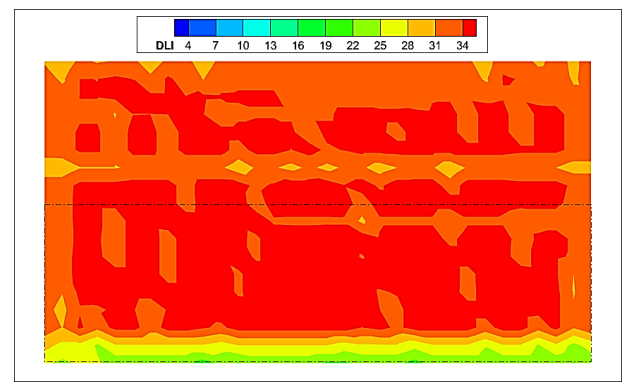
ب / ژانویه



الف / ژانویه

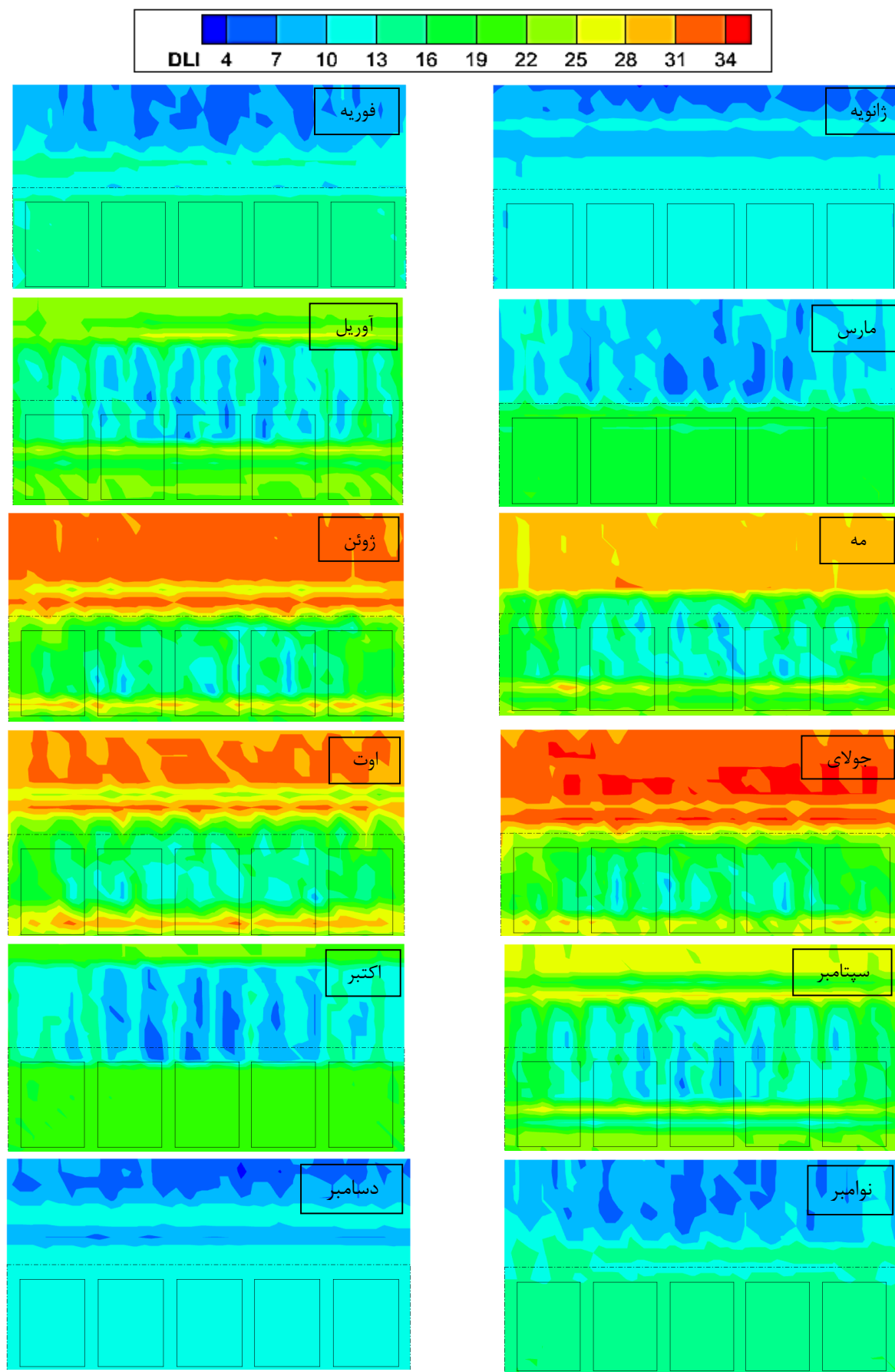


ب / جولای



الف / جولای

شکل ۱۳ مقایسه کانتور تغییرات DLI روزانه (برحسب مول بر مترمربع در روز) داخل گلخانه نمونه در دو حالت؛ الف- بدون پوشش سقف و ب- پوشش ۵۰ درصد سقف جنوبی، برای دو ماه ژانویه (سردترین ماه سال) و جولای (گرم‌ترین ماه سال)



شکل ۱۴ کانطور تغییرات DLI روزانه (برحسب مول بر مترمربع در روز) داخل گلخانه نمونه در شرایط پوشش سقف با ۵۰ درصد پانل فتوولتائیک نصب شده در سقف جنوبی، در ماه‌های مختلف یک‌سال میلادی

جدول ۵ محدوده بهینه نصب لامپ داخل گلخانه در ماه‌های مختلف سال برحسب درصد

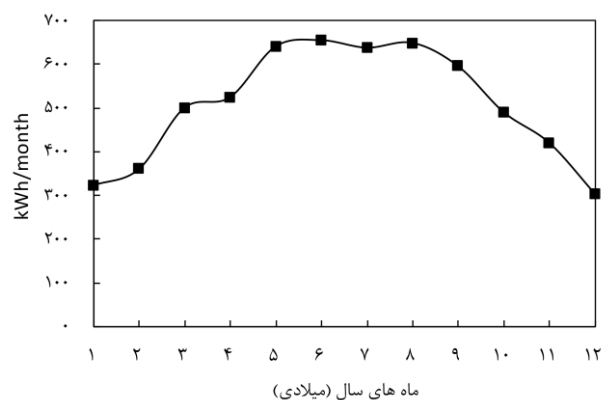
ماه‌های سال به میلادی	جهت طولی (X)	جهت عرضی (Y)
۱	۸۰-۲۰	۱۰۰-۹۰
۲	۷۰-۳۰	۱۰۰-۷۰
۳	۶۰-۴۰	۷۰-۵۵
۴	۵۵-۴۵	۵۵-۴۵
۵	۵۵-۵۰	۵۰-۴۵
۶	۵۰-۴۰	۲۵-۲۰
۷	۵۰-۴۰	۲۵-۲۰
۸	۵۰-۴۰	۲۵-۲۰
۹	۶۰-۳۰	۶۰-۳۵
۱۰	۷۰-۳۰	۸۰-۴۵
۱۱	۸۵-۲۰	۱۰۰-۷۰
۱۲	۹۰-۱۰	۱۰۰-۸۰

۴-۳- صحت‌سنجی و مقایسه نتایج روش تقریبی و دقیق با یکدیگر

در این بخش، نتایج ضریب سایه‌اندازی روش‌های اول و دوم با یکدیگر و همچنین با نتایج یک تحقیق تجربی-تحلیلی به‌منظور صحت‌سنجی داده‌ها مقایسه گردیده است. اعتبارسنجی از طریق مقایسه داده‌ها با تحقیق منتشر شده در سال ۲۰۱۸ توسط مارکو و همکاران [۲۹] و همچنین پژوهش تکمیلی هانریدر و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۳۰] انجام شده است. در این تحقیق، حالات مختلف سایه‌اندازی ناشی از پانل فتوولتائیک برای گلخانه نصب شده در جزیره ساردینیا واقع در کشور ایتالیا با عرض جغرافیایی ۳۹/۲ شمالی و طول جغرافیایی ۸/۶ شرقی بررسی شده است. با توجه به اطلاعات خروجی شبیه‌سازی، می‌توان به مقایسه نرخ سایه‌اندازی از روش دوم با نرخ سایه‌اندازی میانگین تخمینی پرداخت که از معادلات ۳ و ۴ استخراج شده و نتایج آن در جدول (۶) ارائه شده است.

مقایسه نتایج روش تقریبی و دقیق بیانگر این موضوع است که در ماه‌های با شدت تابش خورشید اندک (ماه‌های سرد سال)، میزان خطای استفاده از روش تقریبی قابل توجه خواهد بود؛ به گونه‌ای که در ماه ژانویه، درصد خطای روش تقریبی در حدود ۲۴ درصد می‌باشد؛ اما هر چقدر به سمت ماه‌های گرم سال پیش می‌رویم (زاویه تابش خورشید عمودی‌تر می‌شود)، درصد خطا کاهش یافته و به‌عنوان مثال در ماه ژوئن میزان خطا حدود ۴ درصد خواهد بود.

با توجه به آنکه برای مدل نمونه، ۵ عدد پانل فتوولتائیک با ابعاد هر کدام ۱/۵ در ۲ متر (مساحت هر پانل ۳ مترمربع)، راندمان ۱۹ درصد و زاویه نصب ۲۰ درجه در سقف لحاظ شده است، میزان تولید انرژی الکتریکی ماهانه برحسب کیلووات ساعت از طریق شبیه‌سازی مدل استخراج گردیده که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، بالاترین میزان تولید الکتریسیته در ماه ژوئن با مقدار ۶۵۷ کیلووات ساعت و کمترین آن در ماه دسامبر و برابر با ۳۰۴ کیلووات ساعت بدست آمده است. همچنین کل انرژی تولیدی سالانه صفحات خورشیدی نصب شده در سقف گلخانه برابر با ۶۰۷۴ کیلووات ساعت خواهد شد.



شکل ۱۵ نتایج خروجی انرژی الکتریکی تولیدی ماهانه پانل‌های فتوولتائیک نصب شده در سقف جنوبی گلخانه با پوشش ۵۰ درصد

تولید برق از طریق صفحات خورشیدی علاوه بر کاهش وابستگی سیستم به شبکه سراسری، در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نیز (مانند دی‌اکسید کربن) مؤثر است. طبق گزارشات منتشرشده کمیسیون اروپا و وزارت انرژی آمریکا، تولید CO₂ به ازای هر کیلووات ساعت برق فسیلی به‌طور میانگین برابر با ۴۲۱ گرم می‌باشد [۲۷]. البته این پارامتر در ایران به دلیل فرسودگی شبکه تولید برق در حدود ۷۰۳ گرم گزارش شده است [۲۸]. حال با توجه به تولید برق خورشیدی سالانه ۶۰۷۴ کیلووات ساعت از پانل‌های موجود در سقف گلخانه نمونه، به میزان ۴/۲۷ تن کاهش تولید دی‌اکسید کربن رخ می‌دهد که از دیدگاه زیست‌محیطی حائز اهمیت است.

یکی از مهمترین مزیت‌های شبیه‌سازی نوردهی با این روش، تعیین نقاط بهینه نصب منابع نوری مصنوعی به جهت تأمین کسری نور مورد نیاز گیاه است که با توجه به ماهیت توزیع سایه‌اندازی غیریکنواخت داخل فضا، اهمیت قابل توجهی خواهد داشت. در همین راستا، محدوده مجاز نصب لامپ‌های تأمین نور در جدول (۵) برای مسئله نمونه مشخص شده است.

جدول ۶ مقایسه مقادیر ضریب سایه‌اندازی تحقیق حاضر به روش‌های تقریبی و شبیه‌سازی با مقادیر گزارش شده در مرجع [۲۹]

ماه‌های سال به میلادی	روش تقریبی	روش شبیه‌سازی	مرجع [۲۹]
۱	۴۴/۵	۳۶	۳۶/۴
۲	۴۴/۵	۳۷	۴۴/۵
۳	۴۴/۵	۴۳/۵	۴۵/۲
۴	۴۴/۵	۴۴/۴	۴۳/۸
۵	۴۴/۵	۴۴/۱	۴۲/۳
۶	۴۴/۵	۴۲/۷	۴۳
۷	۴۴/۵	۴۲/۲	۴۲/۳
۸	۴۴/۵	۴۲/۶	۴۳
۹	۴۴/۵	۴۵/۳	۴۵/۲
۱۰	۴۴/۵	۴۳/۳	۴۵/۲
۱۱	۴۴/۵	۴۰/۷	۳۷/۸
۱۲	۴۴/۵	۳۷/۱	۳۳/۴

از سوی دیگر، مقایسه نتایج ضریب سایه‌اندازی از شبیه‌سازی گلخانه با مقاله اعتبارسنجی بیانگر این حقیقت است که همخوانی مطلوبی بین نتایج برقرار است. البته میزان اختلاف اندکی به ویژه در ماه‌های با زاویه قرارگیری خورشید مایل (ماه‌های سرد سال) وجود دارد که دلیل آن می‌تواند تفاوت در عرض جغرافیایی موقعیت دو مسئله با هم باشد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر سایه‌اندازی پانل‌های فتوولتائیک نصب شده روی سقف یک گلخانه بر نور مورد نیاز محصول و میزان تولید انرژی الکتریکی از آنها می‌باشد. علاوه بر این، شناسایی نحوه توزیع نور داخل گلخانه و استخراج نقاط با نرخ سایه بالا برای تعیین موقعیت نصب منابع نوری مصنوعی از دیگر اهداف تحقیق است. در همین راستا، تحلیل برای یک گلخانه نمونه واقع در شهر تهران به دو روش تقریبی و دقیق (شبیه‌سازی) انجام گردید که خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- نرخ سایه‌اندازی ناشی از پوشش ۲۵ درصد سقف گلخانه با پانل فتوولتائیک، تقریباً هیچ اثر نامطلوبی بر نور مورد نیاز محصول نشان نمی‌دهد.

- نرخ پوشش ۵۰ درصدی با صفحات خورشیدی، بالاترین حد مجاز پوشش سقف گلخانه بوده که باعث تغییرات جزئی در کمیت و کیفیت محصول می‌شود. در این شرایط، نیاز است تا توزیع غیر یکنواخت نور به‌منظور جبران کمبود نور طبیعی مورد تحلیل قرار گیرد. همچنین نرخ پوشش بیشتر از ۵۰ درصد می‌تواند نور جذب شده محصول را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

- در شرایط پوشش سقف گلخانه به میزان ۵۰ درصد، توزیع نور طبیعی به گونه‌ای است که در ۲۵ درصد ابتدایی و انتهایی طول گلخانه نیازی به نصب لامپ نمی‌باشد؛ اما در بقیه نواحی با توجه به تغییرات ماهانه نرخ DLI، بخش اندکی از نور مورد نیاز گیاه به دلیل اثرات سایه‌اندازی باید توسط منابع نوردهی مصنوعی تأمین شود.

- میزان انرژی الکتریکی تولیدی صفحات خورشیدی نصب شده در گلخانه نمونه برابر با ۶۰۷۴ کیلووات ساعت در سال به دست آمد که منجر به کاهش ۴/۲۷ تن تولید گاز دی‌اکسید کربن سالانه می‌گردد.

- در شرایط پوشش کامل (۱۰۰ درصدی) سقف گلخانه، انرژی سالانه مورد نیاز که باید توسط لامپ تأمین شود، بین ۱/۸ تا ۳/۵ برابر (برحسب نوع لامپ) انرژی تولیدی کل پانل‌های فتوولتائیک نصب شده خواهد بود که بیانگر عدم توجیه‌پذیری پوشش کامل سقف با پانل می‌باشد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

ADF	ضریب نور روز میانگین (%)
CR	ضریب پوشش سقف (%)
DF	فاکتور (ضریب) نور روز (%)
DLI	ضریب انتگرال نور روزانه ($\text{mol/m}^2.\text{day}$)
E	انرژی (kWh)
h	تعداد ساعات یک طول روز کامل
I	روشنایی (lumen/m^2 یا lux)
PPFD	چگالی شار فوتون فتوسنتزی ($\mu\text{mol/m}^2.\text{s}$)
S_f	فاکتور (ضریب) سایه‌اندازی (%)
S_g	فاکتور کلی انتقال انرژی خورشیدی (g-value - %)
SPD	پارامتر توزیع توان طیفی ($\text{W/m}^2.\text{nm}$)
U	ضریب کلی انتقال حرارت ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
VLT	ضریب انتقال نور مرئی (%)
\dot{W}	توان (kW)

زیرنویس‌ها

ev	پوشش گلخانه
in	ورودی
out	خروجی
pV	پانل فتوولتائیک

۷- مراجع

- [10] F. Blando, C. Gerardi, M. Renna, S. Castellano, and F. Serio, "Characterisation of bioactive compounds in berries from plants grown under innovative photovoltaic greenhouses," *Journal of Berry Research*, vol. 8, no. 1, pp. 55-69, 2018, doi: <https://doi.org/10.3233/JBR-170258>.
- [11] M. Cossu *et al.*, "Agricultural sustainability estimation of the European photovoltaic greenhouses," *European Journal of Agronomy*, vol. 118, p. 126074, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126074>.
- [12] Z. Li, A. Yano, and H. Yoshioka, "Feasibility study of a blind-type photovoltaic roof-shade system designed for simultaneous production of crops and electricity in a greenhouse," *Applied Energy*, vol. 279, p. 115853, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115853>.
- [13] R. Zhang *et al.*, "Dynamics of shaded areas in a typical-shaped solar greenhouse and their effects on tomato growth—A case study in winter," *Scientia Horticulturae*, vol. 312, p. 111882, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111882>.
- [14] G. Ferrara, M. Boselli, M. Palasciano, and A. Mazzeo, "Effect of shading determined by photovoltaic panels installed above the vines on the performance of cv. Corvina (*Vitis vinifera* L.)," *Scientia Horticulturae*, vol. 308, p. 111595, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111595>.
- [15] L. Deng, A. Li, and J. Che, "Distribution and optimization of solar radiation in a solar greenhouse under the influence of wall shading," *Solar Energy*, vol. 284, p. 113034, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113034>.
- [16] Y. Tang, X. Ma, M. Li, and Y. Wang, "The effect of temperature and light on strawberry production in a solar greenhouse," *Solar Energy*, vol. 195, pp. 318-328, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.070>.
- [17] C. Zisis, E. M. Pechlivani, S. Tsimikli, E. Mekeridis, A. Laskarakis, and S. Logothetidis, "Organic Photovoltaics on Greenhouse Rooftops: Effects on Plant Growth," *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 65-72, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.658>.
- [18] G. Trypanagnostopoulos, A. Kavga, M. Souliotis, and Y. Tripanagnostopoulos, "Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics," *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 724-731, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.066>.
- [19] A. Colantoni *et al.*, "Solar Radiation Distribution inside a Greenhouse Prototypal with Photovoltaic Mobile Plant and Effects on Flower Growth," *Sustainability*, vol. 10, no. 3, p. 855, 2018. [Online].
- [1] G. A. Rampinelli *et al.*, "Development of artificial lighting system for light supplementation in smart greenhouses with agrivoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 231, p. 120914, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120914>.
- [2] H. Dinesh and J. M. Pearce, "The potential of agrivoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 299-308, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>.
- [3] S. Gorjian *et al.*, "Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, p. 112126, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>.
- [4] A. Sarr, Y. M. Soro, A. K. Tossa, and L. Diop, "Agrivoltaic, a Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production in Perpetual Mutation: A Comprehensive Review," *Processes*, vol. 11, no. 3, p. 948, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/3/948>.
- [5] A. S. Pascaris, R. Handler, C. Schelly, and J. M. Pearce, "Life cycle assessment of pasture-based agrivoltaic systems: Emissions and energy use of integrated rabbit production," *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 3, p. 100030, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2021.100030>.
- [6] C. Toledo and A. Scognamiglio, "Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)," *Sustainability*, vol. 13, no. 12, p. 6871, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6871>.
- [7] A. Yano *et al.*, "Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse," *Biosystems Engineering*, vol. 106, no. 4, pp. 367-377, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.04.007>.
- [8] A. Marucci and A. Cappuccini, "Dynamic photovoltaic greenhouse: Energy balance in completely clear sky condition during the hot period," *Energy*, vol. 102, pp. 302-312, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.053>.
- [9] M. E. Loik *et al.*, "Wavelength-Selective Solar Photovoltaic Systems: Powering Greenhouses for Plant Growth at the Food-Energy-Water Nexus," *Earth's Future*, vol. 5, no. 10, pp. 1044-1053, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/2016EF000531>.

- [26] A. P. E. R. Institute, *Greenhouse Development Criteria Design Criteria, No. 474*. Bureau of Technical Execution Systems (in Persian), 2008.
- [27] K. Li, H. Fan, and P. Yao, "Estimating carbon emissions from thermal power plants based on thermal characteristics," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 128, p. 103768, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103768>.
- [28] S. Azizi, R. Radfar, H. Nikoomaram, and A. Rajabzadeh Ghotri, "Feasibility study of controlling carbon dioxide emissions from Iranian thermal power plants through CO₂-EOR," (in Persian), *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, vol. 9, 2023.
- [29] M. Cossu *et al.*, "Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic greenhouse types in Europe," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 822-834, 2018/10/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.001>.
- [30] N. Hanrieder, A. Kujawa, A. B. Seychelles, M. Blanco, J. Carballo, and S. Wilbert, "Estimation of maximum photovoltaic cover ratios in greenhouses based on global irradiance data," *Applied Energy*, vol. 365, p. 123232, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123232>.
- Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/855>.
- [20] R. H. E. Hassanien, M. Li, and F. Yin, "The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production," *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 377-388, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.044>.
- [21] M. D. Fairchild, *Color Appearance Models*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [22] N. Mattson, "Greenhouse Lighting," 2014. [Online]. Available: <https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/blogs.cornell.edu/dist/b/5759/files/2015/03/Greenhouse-Lighting-27mfc6l.pdf>
- [23] D. J. Potter and P. Duncombe, "The Effect of Electrical Lighting Power and Irradiance on Indoor-Grown Cannabis Potency and Yield," *Journal of Forensic Sciences*, vol. 57, no. 3, pp. 618-622, 2012, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2011.02024.x>.
- [24] K. Lakhdari, L. Sriti, and B. Painter, "Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions," *Building and Environment*, vol. 204, p. 108173, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>.
- [25] M. Woods, "A global DLI app," *Asian Turfgrass Center*, 2021. [Online]. Available: <https://www.asianturfgrass.com/post/global-dli-app/>.