Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 15-24

Vol. 12/ No. 3/ Fall 2023
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

A novel method to simulate and optimize polymer optical fiber daylighting systems

Mehdi Tajaldini[1*], Fazeleh Morsalpour[2]

[1,2] Department of Photonics, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran
m.tajaldini@kgut.ac.ir(Corresponding author)

Abstract

Optical fiber daylighting systems help enhance the efficiency of solar energy use in lighting systems in domestic, industrial, and agricultural sectors. A lot of work has been done on these systems, but the need for a reliable simulation method to reduce the tolerance, time, and cost is evident. In this regard, this paper proposes a novel method based on two powerful Optifiber and Zemax software for simulating and optimizing an optical fiber daylighting system to increase the efficiency of output power from the fiber. A comparison has been made among popular polymer fibers with OptiFiber software, which shows the maximum propagation of modes in PMMA polystyrene fiber. The detailed characteristics derived from Optifiber related to the selected fiber with a 1 mm diameter have been implemented in Zemax software, and a daylighting system has been simulated. The coupling of light into the optical fiber has been optimized with the Global Optimization Method based on the genetic algorithm. By selecting a 100-W source as the sun according to the AM 1.5 standard, the simulation indicates a transfer of 22 W of power. After optimization, this power increases to 30 W, which shows the role of optimization in increasing the efficiency to 36%. Practical results by testing a system with intensity measurement confirm the simulation results. As a result, by choosing the right fiber, accurately determining the characteristics, and optimizing coupling into the fiber, it is possible to help increase the efficiency of optical fiber daylighting systems.

Keywords: optical fiber, optical fiber daylighting system, PMMA fiber, Optifiber, Zemax, genetics algorithm, light coupling

Submit date: 2022/09/24
Accepted date: 2023/09/12

Corresponding author's name: Mehdi Tajaldini
Corresponding author's Address: Department of Photonics, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۲۴-۱۵

Vol. 13 / No. 3/ Fall 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

ارائه یک روش نوین جهت شبیه سازی و بهینه سازی یک سیستم روشنایی روز فیبر نوری پلیمری

نوع مطالعه: پژوهشی

مهدی تاج الدینی [۱] ، استادیار
فاضله مرسل پور[۲]، دانشجو

۱و۲- گروه فوتونیک- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران
m.tajaldini@kgut.ac.ir

چکیده: **سیستم‌های روشنایی روز فیبر نوری به بهره‌وری در استفاده از انرژی خورشید در سیستم روشنایی در بخش های خانگی، صنعتی و کشاورزی کمک شایانی می‌کنند. کارهای زیادی روی این سیستم ها انجام شده است اما فقدان یک روش شبیه سازی مطمئن برای کاهش خطای مجاز در ساخت، زمان و هزینه، به چشم می خورد. در همین راستا، در این مقاله، یک روش نوین مبتنی بر دو نرم افزار قدرتمند Optifiber و Zemax، برای شبیه سازی و بهینه سازی یک سیستم روشنایی روز فیبر نوری با هدف افزایش بازده توان خروجی از فیبر ارائه شده است. مقایسه ای بین انواع مطرح فیبرهای پلیمری با نرم افزار OptiFiber انجام شده است که نشان دهنده انتشار حداکثری مد ها در فیبر PMMA پلی استیرن است. مشخصه های دقیق مستخرج از Optifiber مربوط به فیبر منتخب با قطر ۱ میلی‌متر در نرم افزار Zemax پیاده سازی و یک سیستم روشنایی روز شبیه سازی شده است. تزویج نور به درون فیبر نوری با روش Global Optimization مبتنی بر الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. با انتخاب یک منبع ۱۰۰ وات برای خورشید مطابق استاندارد AM 1.5 شبیه سازی حاکی از انتقال ۲۲ وات توان است. پس از بهینه سازی این توان به ۳۰ وات افزایش می یابد که نشان از نقش بهینه سازی بر افزایش ۳۶ درصدی بازده دارد. نتایج عملی با آزمایش روی یک سیستم با اندازه گیری شدت، نتایج شبیه سازی را تایید می کند. در نتیجه، با انتخاب فیبر مناسب و تعیین دقیق مشخصه ها، و بهینه سازی تزویج به درون فیبر می توان به افزایش بازده سیستم های روشنایی روز فیبر نوری کمک کرد.**

واژه های کلیدی: **فیبر های نوری، سیستم های روشنایی روز فیبر نوری ، فیبر PMMA، OptiFiber، Zemax، الگوریتم ژنتیک، تزویج نور**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۶/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی تاج الدینی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : گروه فوتونیک - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]

۱- مقدمه

جمعیت جهان در سال ۲۰۲۲ از ۸ میلیارد عبور کرده است و طبق گزارشات موسسه Census Bureau تا سال ۲۰۵۰ باید انتظار جمعیتی فراتر از ۹ میلیارد داشت(Bureau, 2022). نیاز روزافزون جوامع بشری به تولید مواد غذایی، روشنایی و توسعه تکنولوژی و سلامتی مستلزم مصرف انرژی بیشتر است. در حالی که ذخایر انرژی فسیلی محدود و با تولید گازهای گلخانه ای سلامتی بشر و محیط زیست را به خطر می اندازد. به همین دلیل آژانس بین المللی انرژی[1] برنامه ای برای به صفر رساندن استفاده از سوخت های فسیلی تا سال ۲۰۵۰ در جهان ارائه کرده است تا فرصتی برای جلوگیری از فاجعه گرمایش بی‌رویه زمین و دیگر معضلات باشد (Potrč et al., 2021). در همین راستا اندیشکده IEA در پاریس خواستار افزایش سریع و گسترده سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدید پذیر است. به طوری‌که تا سال ۲۰۳۰، ظرفیت تولید برق از خورشید به اندازه ۶۳۰ مگاوات و از باد ۳۹۰ مگاوات، چشم انداز این موسسه است(IEA, 2021) .

بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر خورشید است و سهم بزرگی از تولید برق را به خود اختصاص می‌دهد. در کنار تولید برق، برای بهره‌وری در مصرف انرژی و کاهش هزینه، در برخی موارد می‌توان مستقیم و بدون تبدیل به انرژی الکتریکی از نور خورشید برای کاربردهای حرارتی و روشنایی روز نیز بهره برد.

یکی از منابع اصلی مصرف برق و انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان، مربوط به روشنایی ساختمان‌ها و مراکز مسقف صنعتی و کشاورزی است. مصرف برق ناشی از روشنایی الکتریکی با مصرف ۴۰ تا ۵۰٪ از کل انرژی در حال تبدیل شدن به یک مشکل اساسی است. پاسخ به این مسئله می تواند گسترش سیستم های روشنایی روز[2] باشد(Abd Rashid & Yusoff, 2015).

روشنایی روز ، نقش بسزایی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر دارد و این امکان را برای کاهش مصرف برق در توسعه پایدار فراهم می‌کند. توسعه یک سیستم جمع آوری و توزیع نور خورشید مناسب و کارآمد، ما را به راه حلی برای مسئله انرژی، که به طور فزاینده‌ای جدی‌تر شده است، هدایت می کند. تخمین زده می شود که ساختمان‌های کارآمد با نور روز مصرف انرژی روشنایی الکتریکی را بین ۵۰ تا ۸۰٪ کاهش می‌دهند.

سیستم‌های روشنایی روز کمک شایانی به بخش کشاورزی در مکان های مسقف می کند و طیف مورد نیاز گیاهان را به آن ها می‌رساند. در نتیجه بهره‌وری بالایی در تولید مواد غذایی گیاهی گلخانه ای بدون مصرف برق و ایجاد طیف ساختگی خواهند داشت(Council, 1995; Lapsa et al., 2007) .

۷۸ میلیون نفر به دلیل ناکافی بودن ویتامین D، دچار کمبود کلسیم هستند و ۱۵٪ از کارمندان ادارات از خستگی چشم در زیر نور مصنوعی شکایت دارند. بنابراین سیستم‌های روشنایی روز می‌توانند امکان قرار گرفتن فرد در معرض طیف طبیعی خورشید در طول روز در محیط مسقف را فراهم کنند تا علاوه بر تامین ویتامین D از تاثیرات مثبت نور خورشید بر روی بدن انسان از قبیل؛ ایجاد حس نشاط، کاهش اختلال عاطفی فصلی و غیره بهره مند شوند (Ullah, 2014).

سیستم روشنایی روز مبتنی بر فیبرهای نوری به عنوان یک سیستم برگزیده روشنایی روز، این امکان را فراهم می‌کند که بدون تلفات انرژی بتوان از نور خورشید حتی برای فضاهایی که تنها امکان استفاده از لامپ الکتریکی را دارند، بهره جست. این سیستم همچنین در محل‌های مختلفی مثل کشاورزی در مکان های مسقف، سنگرهای نظامی، انبارها، تونل‌های زیرزمینی، ساختمان‌های چند طبقه و محل‌هایی که امکان دسترسی به انرژی الکتریکی نیست و یا محدودیت سوخت وجود دارد، کاربرد دارند(Lapsa et al., 2007).

این سیستم تشکیل شده از: جمع کننده[3] نور خورشید ، فیبر نوری جهت انتقال، و پخش کننده[4] نور جهت پخش در فضای اتاق. شایان ذکر است که در این‌گونه سیستم‌ها حذف قسمت های مضر طیف خورشید نیز با فیلتر امکان پذیر است. جمع کننده نور از عدسی ها و یا آیینه ها تشکیل شده است. برای انتقال از فیبرهای چند مدی سیلیکنی، پلاستیکی و پلیمری استفاده می شود. پخش کننده ها در سیستم های هیبریدی، مشابه پخش کننده های لامپ های هالوژنی و LED ها هستند(Maxey et al., 2007).

بازده سیستم روشنایی روز فیبر نوری یکی از مسائل اصلی پیش روی محققین بوده است. طراحی و مدل سازی هر کدام از اجزاء و همچنین تزویج[5] بیشتر نور به درون فیبر نوری برای افزایش بازده به طور تجربی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته اند(Whang, 2019). در بحث جمع کننده ها محققین دریافتند که چیدمانی از عدسی ها بازده بالاتری را نسبت به همتای مبتنی بر آیینه ها بدست می دهد(Kumar et al., 2015). لنزهای فرنل به صورت، سلسله حلقه‌های متحد المرکزی که بر روی یک سطح صاف و با یک رابطه منظم مجتمع می‌شوند تا فاصله کانونی کوتاهی را به وجود بیاورند، به عنوان بهترین عدسی ها برای جمع کننده ها تعریف شده و منجر به افزایش بازده شده‌اند(Wang et al., 2018). درمیان انواع فیبرهای نوری، فیبرهای

[1] International Energy Agency
[2] Day lighting
[3] Collector
[4] Diffuser
[5] Coupling

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]

سیلیکنی که بیشترین خلوص و کمترین افت را دارند بدلیل شعاع خمش کم، ماهیت شکننده و همچنین، هزینه بالای ساخت و انحصاری بودن، در عمل جهت استفاده در سیستم‌های روشنایی روز فیبر نوری امکان استفاده ندارند(Driggers, 2003). در این میان مطالعات نشان می دهد که فیبرهای پلاستیکی و پلیمری با برطرف کردن معایب اصلی همچون افت بالا، مقاومت دمایی پایین و پهنای باند باریک برای استفاده در اینگونه سیستم ها ترجیح داده می‌شوند(Bhowmik & Peng, 2019). در سال های اخیر استفاده از فیبرهای پلیمری نسبت به فیبرهای پلاستیکی افزایش یافته است و دلیل آن به داشتن پوشش، قابل کنترل بودن ضریب شکست، شفافیت و در نتیجه افت آن‌ها بر می‌گردد. بررسی ها روی پخش کننده ها، منجر به چراغ‌های خورشیدی هیبریدی مجهز به لامپ‌های الکتریکی کم نور و یک سلول خورشیدی برای تکمیل نور طبیعی در زمان‌های ابری یا در شب شده است. برای محاسبه بازده پخش‌کننده، تابش خورشید به عنوان ورودی و لومن نور تابشی توسط آن‌ها به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. که بدون پرداختن به اجزاء سیستم، بازده کل سیستم را بدست می‌دهد (Sreelakshmi & Ramamurthy, 2022).

چیدمان های متفاوتی به صورت تجربی برای افزایش بازده این سیستم‌ها مورد تحلیل و آزمایش قرار گرفته است، اعم از طراحی و مقایسه دیش های جمع کننده نور خورشید (Al-Amayreh et al., 2020)، جمع کننده ترکیبی از لنز و سلول (Xia et al., 2023)، مقایسه انواع فیبرها، تغییر مشخصه های فیزیکی و شیمیایی فیبرهای نوری (Sreelakshmi & Ramamurthy, 2022)، روابط تزویج(Han et al., 2013)، تعیین طیف در سیستم شامل فیبر پلاستیکی (Chen, 2022)، کاستن اثرات گرمایی طیف مادون قرمز در دهانه ورودی فیبر (Shen et al., 2022) و غیره.

در این میان خلاء، یک روش شبیه سازی و بهینه سازی مطمئن و دقیق برای کاهش هزینه، زمان و خطای ساخت چشمگیر است. به همین دلیل در این مقاله، به کمک دو نرم افزار قدرتمند Optifiber و Zemax به ارائه یک روش نوین برای مدل سازی فیبر نوری پلیمری منتقل کننده، شبیه سازی و بهینه سازی یک سیستم شامل فیبر به عنوان انتقال دهنده و لنز فرنل به عنوان جمع کننده، پرداخته شد و در نتیجه، با استفاده از پارامترهای حیاتی با گزینه Global Optimization که مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است، تزویج نور به درون فیبر نوری بهینه و بازده افزایش یافت.

در این راستا، ابتدا با مقایسه سه نوع فیبر پلیمری مطرح بهترین انتخاب شد و مشخصه های دقیق آن در Optifiber مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. سپس، مشخصه های نتیجه گرفته در نرم افزار Zemax پیاده سازی و با اضافه کردن لنز فرنل، سیستم شبیه سازی شد. شبیه‌سازی مبتنی بر رهگیری پرتو های نور در ورودی و خروجی اجزاء و اندازه گیری بوسیله آشکار ساز ها است. در نهایت با تعریف یک تابع برازش و چند ویژگی، تزویج به درون فیبر نوری بهینه شد و بازده افزایش پیدا کرد. این روش می تواند با کاهش خطای مجاز در ساخت و کاهش هزینه و زمان کمک شایانی در راه پیاده سازی گسترده سیستم های روشنایی روز فیبر نوری با بالاترین بازده، باشد.

۲- روش و مواد

در روش پیشنهادی از دو نرم افزار Optifiber و Zemax به ترتیب برای مدل سازی فیبر نوری و شبیه سازی سیستم روشنایی روز فیبر نوری بهره برده شده است. در این روش ابتدا، فیبر منتخب در نرم افزار Optifiber مشخصه یابی می شود و سپس مشخصه های فیبر و دیگر المان ها در نرم افزار Zemax برای شبیه سازی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۱ شبیه سازی

نرم‌افزار Zemax یک نرم‌افزار قدرتمند طراحی اپتیکی است که برای طراحی و آنالیز سیستم‌های اپتیکی و نورپردازی[6] مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرم‌افزار به‌وسیله ردیابی پرتو، انتشار پرتوها را در یک سیستم نوری مدل‌سازی می‌کند. در واقع می‌تواند اثر المان‌های نوری مانند لنزهای معمولی، لنزهای کروی، لنزهای شاخص گرادیان، آینه‌ها، فیبرهای نوری چند مدی و المان‌های نوری پراشنده را به‌صورت استاندارد بررسی کرده و نمودارهای نقطه‌ای و پرتویی را تولید نماید. اندازه گیری توان در این نرم افزار با جایگذاری آرایه‌ای از آشکارسازها در خروجی یا ورودی هر المان قابل اندازه‌گیری است.

نرم‌افزار از کتابخانه‌ای متشکل از عدسی‌های تجاری، مواد اپتیکی و لایه نشانی بهره می‌برد و می‌تواند در دو حالت ردیابی ترتیبی پرتو (sequential) از طریق المان‌های نوری و ردیابی غیر ترتیبی پرتو (non-sequential) برای آنالیز نورهای پراکنده و اپتیک فیزیکی انتشار پرتو، کار کند. همچنین، دارای قابلیت تلورانس‌گذاری به جهت تحلیل اثر نقص تولید و خطای مونتاژ است (Radiant Vision Systems, 2022).

این نرم‌افزار می‌تواند برای ادواتی که پراش آن‌ها بسیار مهم است، مانند: انتشار پرتو و جفت‌شدگی نور[7] در فیبر نوری مورد استفاده قرار گیرد. ابزار بهینه‌سازی این نرم‌افزار می‌تواند با تنظیم خودکار پارامترها طراحی اولیه لنزها را در یک سیستم نوری بهبود بخشد و کارایی را در نتیجه کاهش ابیراهی‌ها، افزایش دهد تا در ساخت تجاری با هزینه و زمان کمتر، سیستمی با بالاترین بهره تولید شود.

نرم‌افزار Optifiber یک ابزار قدرتمند برای حل عددی مدهای هدایتی فیبر نوری است و پارامترهای تاخیر گروهی[8]، پاشندگی سرعت گروه[9]، تلفات، پروفایل مودی موثر[10]، پاشندگی قطبش مد، ضریب موثر

Illumination [6]
Light coupling [7]
Group delay [8]
Group velocity dispersion [9]

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]

غیرخطی و غیره را محاسبه می‌کند. علاوه بر این مشخصه‌های مفید، نرم‌افزار OptiFiber قادر است تا با هدف دستیابی به یک طراحی با ویژگی خاص نظیر فیبر با بزرگترین ناحیه مدی ساختار فیبر را بهینه‌سازی کند(Optiwave, 2014).

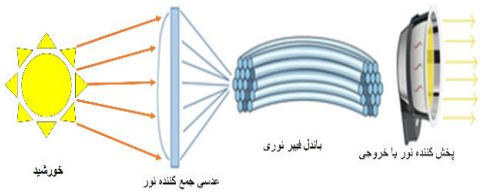
قابل ذکر است که پارامتر افت در یک طول از فیبر پس از محاسبه توان ورودی و خروجی با معادله زیر قابل محاسبه است.

$$IL = -10\log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه بالا IL، P_{in} و P_{out} به ترتیب افت تحمیلی، توان ورودی و توان خروجی را نشان می‌دهند. واحد افت دسی بل است.

در این نرم‌افزار با استفاده از گزینه‌های موجود می‌توان ویژگی‌های اصلی فیبر طراحی شده همچون تعداد مدها، مشخصات مد اساسی، طول موج قطع[11]، ضریب شکست مضاعف پاشندگی و تاخیر گروهی، عرض مد و تلفات ماده، پاشندگی و تاخیر گروهی، تلفات ماده و پاشندگی مد پلاریزه[12] را محاسبه نمود.

در نتیجه، با استفاده از نرم افزار Optifiber می توان مشخصه های فیبر نوری پیشنهادی را بدست آورد و جهت بهینه سازی در نرم افزار Zemax پیاده سازی کرد.



شکل (۱): ساختار شماتیک از یک سیستم روشنایی روز فیبر نوری

۲-۲ مدلسازی و طراحی

در این مقاله، سه بخش اصلی یک مسیر انتقال دهنده تک فیبر در سیستم روشنایی روز فیبر نوری، یعنی منبع نور به عنوان نور خورشید، لنز و فیبر نوری در محیط نرم افزاری شبیه‌سازی و سپس آنالیز و بهینه‌سازی شده‌است. شایان ذکر است که در این مقاله تمرکز بر توان دریافتی است که توسط پخش کننده در خروجی فیبر نوری دریافت می‌شود. شکل۱ به طور شماتیک سیستم روشنایی روز فیبر نوری مورد نظر را نشان می دهد.

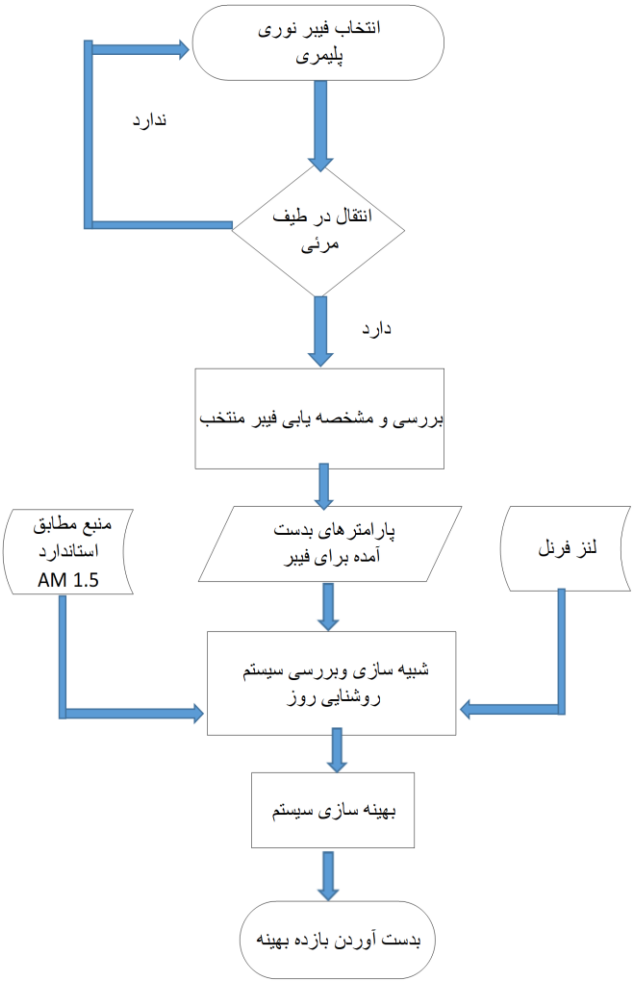
منبعی با توان ۱۰۰ وات در فاصله ۵۰ سانتی متری از لنز جمع کننده مطابق با استاندارد AM 1.5[13] که باند طیفی خورشید را دارا است به عنوان منبع استفاده می‌شود.

به عنوان مولفه جمع کننده از یک لنز فرنل[14] از جنس ACRYLIC با قطر۳ سانتی متر و فاصله کانونی۳/۵ سانتی متر، جهت جمع‌آوری و تزریق نور به درون فیبر نوری استفاده می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی، فیبر نوری پلیمری با ۱۰۰ سانتی متر طول و ۱ میلی متر قطر انتخاب می‌شود. هسته[15] مرکزی از جنس PS[16] و غلاف[17] از جنس PMMA[18] در نظر گرفته شده اند، قابل ذکر است که جنس این دو سطح پس از تجزیه و تحلیل و مقایسه سه نوع فیبر پلیمری مطرح از نتایج نرم افزار Optifiber انتخاب شده است.

به دلیل اینکه در این شبیه‌سازی هدف بررسی نور ورودی و خروجی به درون فیبر است نیاز به المان‌هایی است تا به کمک آن‌ها بتوان نور را آنالیز کرد. المان‌هایی که این نقش را به عهده دارند، آشکارسازهای نور از نوع قطبی (Polar) هستند. یک آرایه از آشکارسازها را در ورودی فیبر و یک آرایه دیگر در خروجی فیبر قرار داده شدند تا بتوان نور ورودی و خروجی به فیبر را بررسی کرد.

در شکل (۲) روندنمای روش پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل (۲): روند نمای روش پیشنهادی

[10] Effective modal profile

[11] Cut off wavelength
[12] Polarization mode dispersion
[13] Air Mass 1.5

[14] Feresnel lens
[15] Core
[16] Polystyrene
[16] Clad
[18] Polymethyl Methacrylate

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]

۳- نتایج

پس از اینکه مدل‌سازی در نرم افزار Optifiber بـه انجـام‌رسـید، نتایج حاصل مورد تجزیـه تحلیـل قـرار گرفتـه و مشخصـه هـای فیبـر منتخب (به عنوان بهترین گزینه) به عنوان فیبر مورد اسـتفاده در نـرم افزار Zemax پیاده سازی می‌شود. در مرحله بعد مشخصه تمام المـان ها اعم از فیبر، عدسی و آشکارسازها در نرم افزار Zemax پیاده سـازی و یک سیستم روشنایی روز فیبر نـوری شـبیه سـازی و سـپس بهینـه سازی می‌شود.

۳-۱ تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از Optifiber

فیبرهای نوری پلیمری، در رسته فیبرهای چنـد مـدی افـت بیشـتری نسبت به فیبرهای سیلیکنی دارند، اما برخی ویژگی‌هـای مثبـت آن‌هـا همچون هزینه کم تولید، انعطاف پذیری و سهولت کاربرد باعـث شـده است که این نوع فیبرها در سیستم‌های روشنایی روز نسبت به سیستم های مخابراتی با توجه به طول انتقال کمتر ، ترجیح داده شوند.
فیبرهای پلیمـری نیـز در انـواع مختلـف و بـا مـواد متفـاوتی سـاخته می‌شوند کـه در ایـن میـان، مـوادی از قبیـل: پلـی متیـل متاکریلیـت (PMMA)، پلی استرین (PS) و پلیمرهای فلوئور شـده (FP)، کـاربرد بیشتری دارند. در نتیجه، جهت طراحی، سه نوع فیبـر پلیمـری کـه بـا این مواد ساخته می‌شوند و درصنعت پرکاربردترین ها هستند، در نظـر گرفته شده اند. اطلاعات مربوط به این فیبرها در جـدول (۳-۱) آورده شده‌است.

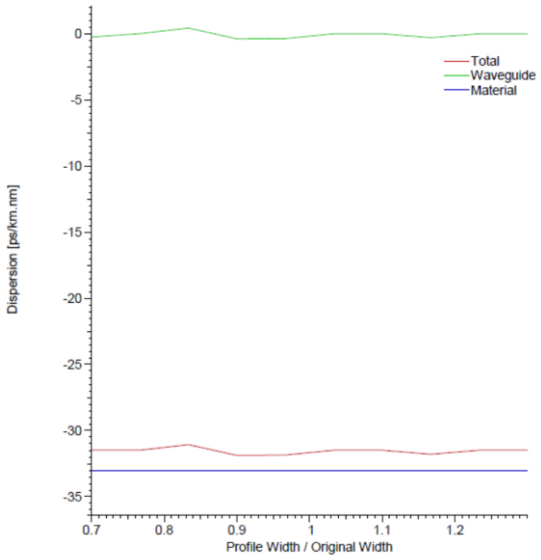
جدول ۱: اطلاعات مربوط به سه نوع فیبر پلیمری قابل استفاده

شعاع فیبر	ضریب شکست پوشش	ضریب شکست هسته	جنس پوشش	جنس هسته
1mm	1.49	1.59	PMMA[20]	PS[19]
1mm	1.42	1.49	FP1[21]	PMMA
1mm	1.4	1.49	FP2[22]	PMMA

وقتی این سه فیبر را از لحاظ مدها بررسی شدند. ایـن نتیجـه حاصـل شد که دو فیبری که از هسته PMMA و روکش FP تشکیل شده‌انـد در طول‌موج‌های طیف مرئی هـیچ مـدی را انتشـار نمـی‌دهنـد و ایـن مهمترین و تنها دلیل کافی برای انتخاب فیبر با هسـته PS و پوشـش PMMA است.

۳-۱-۱ بررسی و استخراج مشخصه‌های فیبر PS-PMMA

شکل (۳) نمودار پاشندگی را در عـرض پروفایـل فیبـر منتخـب نشـان می‌دهد. همانگونه که مشخص اسـت پاشـندگی کـل و مـاده در میانـه طیف مرئی منفی و پاشندگی موجبر صفراست. از آنجا کـه پاشـندگی یک عامل مخرب است، این نتیجه، کیفیـت ایـن فیبـر را بـرای انتقـال نشان می‌دهد.



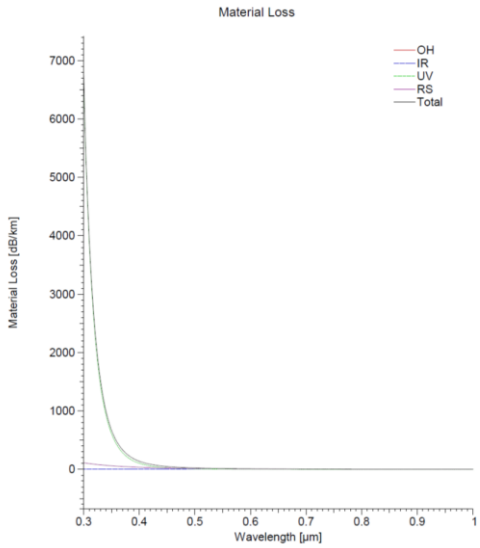
شکل (۳): پاشندگی رنگی در عرض موجبر

نمودار افت ماده در طیف مرئی در شکل (۴) نشـان داده شـده اسـت و همانگونه که مشخص است افت ماده با جذابیت در بازه طول موج مرئی روند نزولی را به سمت صفر طی می‌کند. افت ماده ناشی از چند عامـل مختلف شامل جذب OH[23]، جـذب IR[24] ، جـذب UV[۲۵] و پراکنـدگی رایلی[۲۶] می‌باشد. عدم وجود افت ماده در فیبر مورد نظر جـذابیت آن را بالاتر می‌برد و نشان می‌دهد که تنها افت مربوط به مدهای تابشی (مـد هایی که خارج از هسته منتشر می‌شوند) در طـول فیبـر اسـت کـه بـا معادله ۱ قابل محاسبه است.

[20] Polystyrene
Polymethyl Methacrylate
[21] Fluorinated Polymer-1
[22] Fluorinated Polymer-2

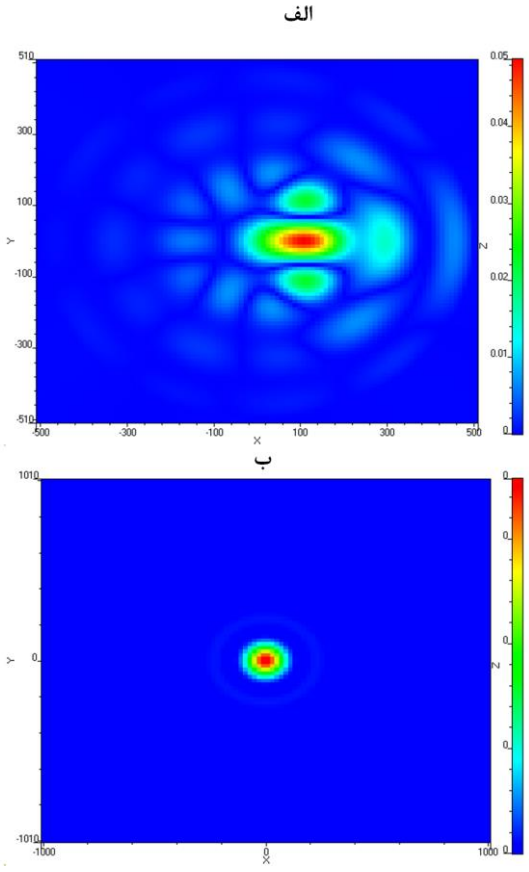
[23] Hydroxyl Ion
[24] Infrared
[23] Ultraviolet
[26] Rayleigh Scattering

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]



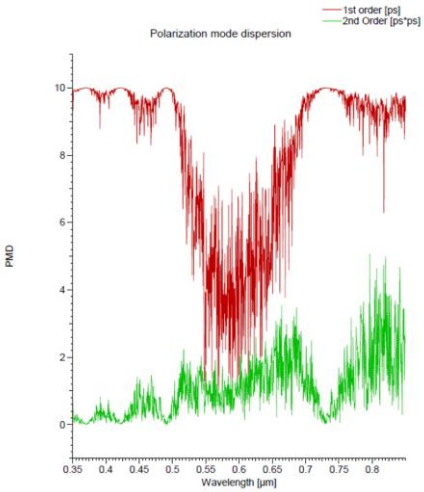
شکل (۴):افت ماده در فیبر در بازه طیف مرئی

شکل‌های (۵) الف و ب نمایه شدت میدان الکتریکی حاصل از برهمنهی مد های هدایت شده را به ترتیب در مقطع فیبرهای *1mm* و *2mm* نشان می‌دهند. از مقایسه شکل ها می توان نتیجه گرفت که فیبر با ضخامت *1mm* در مقطع خروجی شدت میدان بیشتری دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که؛ در نظر گرفتن فیبرهای پلیمری با مقطع بزرگتر کمک شایانی به افزایش توان خروجی نمی کند.



شکل (۵): نمایه میدان الکتریکی نرمالیزه حاصل از تداخل مدها در مقطع فیبر های الف: 1mm و ب: 2mm

شکل (۶) پاشندگی قطبش مدی[27] را در طیف مرئی برای فیبر انتخابی نشان می‌دهد. PMD به دلیل عدم تقارن هسته رخ می دهد که در فیبرهای پلیمری و پلاستیکی غیرقابل اجتناب است. همانطور که مشخص است در بازه طیف مرئی مقدار PMD کاهش یافته است و مقدار میانگین و RMS آن نیز به ترتیب *۱/۸۵ ps* و *۲/۴۲ ps* است. در نتیجه کاهش افت ماده، پاشندگی منفی و کاهش PMD در طیف مرئی بیانگر توانایی و قابلیت اطمینان فیبر منتخب برای استفاده در سیستم روشنایی است. در جدول ۲ چند ویژگی برتر این فیبر برای پیاده و مدل سازی در شبیه سازی آورده شده است. نتایج جدول حاصل بررسی و تحلیل فیبر در نرم افزار Optifiber می‌باشد.



شکل ۶: پاشندگی مد پلاریزه (PMD) در طیف مرئی

جدول ۲: خلاصه اطلاعات مربوط به فیبر پلیمری منتخب

Core	Polystyrene
Cladding	Polymethyl methacrylate
n1	۱/۵۹
n2	۱/۴۹
NA	۰/۵۵
PMD (ps)	۱/۸۵
Diameter (mm)	۱
Cut-Off (µm)	۸/۲۲

[27] Polarization Mode Dispersion (PMD)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]

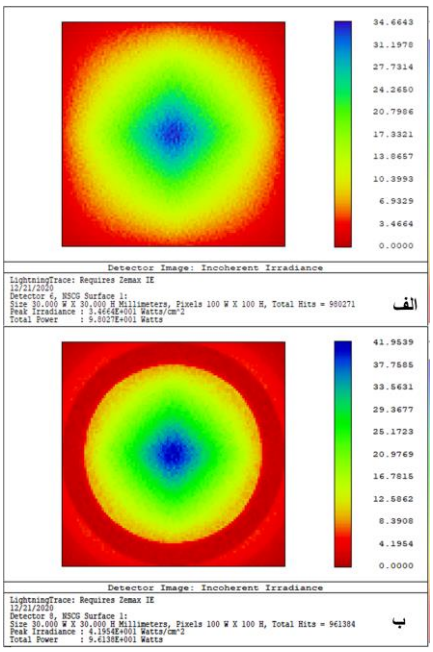
۲-۳ تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی شده با Zemax

حال که نتایج حاصل از نرم افزار Optifiber تجزیه و تحلیل و در نتیجه فیبر مناسب مشخصه یابی شد. مشخصه های درج شده در جدول ۲ به همراه مشخصات یک لنز فرنل(مشخصات در بخش۲) به عنوان جمع کننده و همچنین مشخصات منبع نور در نرم افزار Zemax پیاده سازی شده و یک سیستم روشنایی روز فیبر نوری تک فیبره شبیه سازی شد.

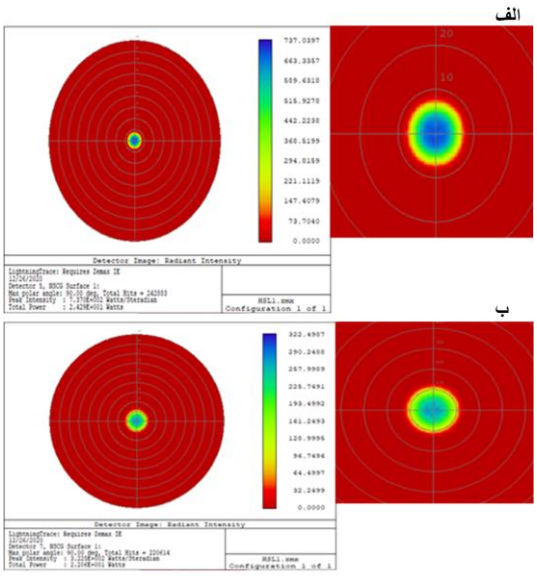
در این نوع سیستم مهمترین مشخصه، انتقال است. به همین دلیل، از آشکارسازها در ورودی و خروجی استفاده شده است.

شکل (۷) الف و ب به ترتیب نتایج آشکارسازهای قبل و بعد از لنز را نشان می‌دهند. پروفایل شدت به نمایش درآمده و توان در نقطه ای که آشکارساز قرار گرفته اندازه گیری می‌شود. توان رسیده به آشکارساز قبل از لنز ۹۸ وات و پس از عبور از لنز این مقدار به ۹۶ وات کاهش می‌یابد. این افت دو واحدی توان به دلیل جذب ناشی از ضخامت و جنس لنز است.

شکل(۸) الف و ب به ترتیب آشکارسازهای ورودی و خروجی فیبر را نشان می‌دهند، با استفاده از این لنز مقدار ۲۴ وات نور به درون فیبر تزویج شده‌است که پس از طی ۱ متر طول فیبر و افت ناشی از آن، این مقدار به ۲۲ وات کاهش یافته است. همچنین از الگوی رنگی نور مشخص است که هرچه از مرکز فیبر به سمت لبه‌ها می‌رویم شدت نور کاهش می‌یابد، دلیل این موضوع نیز این است که در مرکز فیبر پرتوهای پر انرژی‌تری منتشر می‌شوند و این پرتوها عموما مسیر کوتاه تری را درون فیبر طی می‌کنند و به همین دلیل افت کمتری نیز دارند، این پرتو ها مربوط به مد های مرتبه پایین تر می‌باشند.



شکل (۷):نتیجه آشکار ساز الف: قبل از لنز فرنل و ب: بعد از لنز فرنل

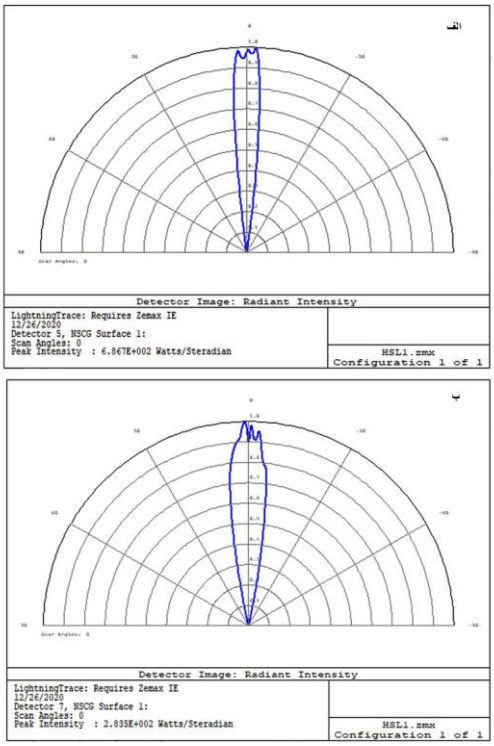


شکل (۸):نتایج آشکارساز های الف. ورودی فیبر نوری و ب. خروجی فیبر نوری

نمودارهای زاویه فضایی نور در ورودی و خروجی فیبر در شکل (۹) نمایش داده شده‌اند، که در این شکل‌ها هم مشخص است که نور پس از خروج از فیبر زاویه بیشتری (پخش شدگی بیشتری) دارد و پیک شدت نیز کاهش یافته است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]



شکل ۹: نمودار فضایی الف) نور وارد شده به فیبر ب) نور خارج شده از فیبر

مقدار افت از معادله (۱)؛ با توجه به توان ورودی و خروجی به فیبر در واحد طول *dB/m* ۰/۴ بدست آمد که مقدار نسبتا قابل قبولی برای یک فیبر نوری پلیمری می‌باشد.

۳-۳ نتایج حاصل از آزمایش

لنز فرنل با قطر 3cm در محفظه یک شبیه ساز سلول خورشیدی متشکل از ۴ لامپ هالوژنی قرار گرفت. یک سر فیبر پلیمری PMMA با قطر *1mm* و طول *100Cm* در فاصله کانونی لنز فرنل ثابت شد. با یک پیرانومتر مدل TES-1333 شدت نور در محل لنز فرنل و همچنین در خروجی فیبر نوری اندازه گیری شد. شدت در محفظه *1280 W/m²* و در خروجی فیبر *267 W/m²* توسط پیرانومتر ثبت شد که نشان دهنده ۲۱٪ بازده سیستم است. نتایج شبیه سازی با ۲۲٪ بازده در تطابق مناسبی با نتیجه عملی است. علاوه بر این آقای زیا[28] و همکارانش بازده سیستم های روشنایی با انتقال توسط فیبر را بین ۱۵ تا ۲۹٪ ثبت کرده اند(Xia et al., 2023).

۴-۳ بهینه سازی تزویج نور به درون فیبر

نرم افزار Zemax قادر به بهینه سازی سیستم اپتیکی با استفاده از چهار روش مختلف تحت عناوین، بهینه سازی محلی[29]، بهینه سازی چکشی[30]، بهینه سازی مجازی و بهینه سازی جهانی[31] است که هرکدام از الگوریتم خاصی استفاده می‌کنند.

در سیستم طراحی شده بهبود تزویج نور به درون فیبر اهمیت ویژه ای دارد که می تواند بازده سیستم را افزایش دهد، به همین دلیل از بهینه‌سازی توسط خود نرم افزار Zemax کمک گرفته شد و به طور خاص از روش بهینه سازی جهانی که بر پایه الگوریتم ژنتیک است، بهره برده شد، مزیت این روش نسبت به دیگر روش‌های تعریف شده در Zemax این است که در مینیمم های محلی گیر نمی‌کند.

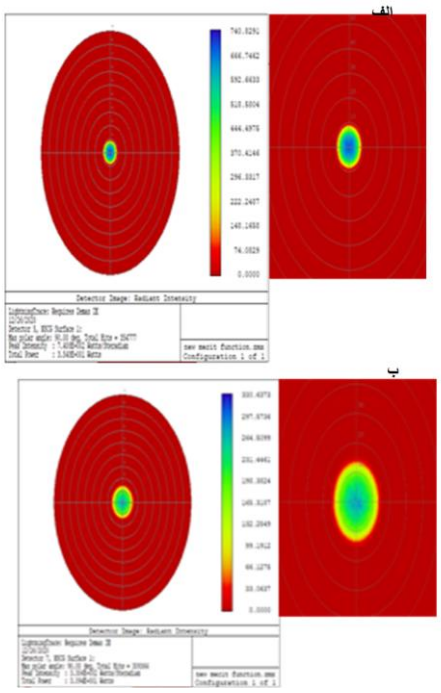
در جدول Comment Editor دو پارامتر ، ضخامت و قطر لنز فرنل به صورت متغییر در نظر گرفته شدند.

تابع شایستگی، RMS شعاعی لکه نسبت به پرتو اصلی (محوری) در نظر گرفته شد. به ازای هر طول موج یک دایره و ۶ بازو درنظر گرفته شد. یعنی هر طول موج از طیف مرئی روی دهانه فیبر یک لکه دایره ای ایجاد می کند که عبارت از ۷ پرتو می باشد و ۶ پرتو از خروجی لنز به محیط دایره می رسند. در جدول Merit Function توابع شایستگی بر اساس پیش فرض خود نرم افزار، RMS لکه مربوط به هر کدام از این پرتوها می باشد که عبارت از ۴۲ تابع شایستگی که تابع شایستگی تحت عنوان ردگیری پرتو با نام NSTR[32] لحاظ می شوند. نرم افزار به هرکدام از این ۴۲ تابع، مقدار هدف، وزن، مقدار کنونی و در صد سهم اختصاص می دهد. وزن توابع به مساحت جاروب شده روی مقطع ورودی فیبر بر می‌گردد به طوریکه هر چه مساحت بیشتر باشد وزن بیشتری را به آن اختصاص می دهد. و سهم آن ها متناسب با ضرب وزن در اختلاف هدف با مقدار کنونی است. به این ترتیب با اجرای بهینه سازی جهانی با ۷۴۵۶ دور (cycle) اجرا در مدت ۳ دقیقه بهینه سازی انجام شد. مقادیر بهینه ضخامت و قطر لنز فرنل به ترتیب ۸ و ۱۸ میلی‌متر بدست آمد که به طور اتوماتیک در Command دیده شد (Radiant Vision Systems, 2022).

پس از انجام بهینه‌سازی و شبیه سازی مجدد بر اساس پارامترهای بهینه لنز فرنل و بررسی آشکارسازها مشخص شد که طبق انتظار، ورود و خروج نور به فیبر نوری به ترتیب به و ۳۵ و ۳۰ وات افزایش پیدا کرده‌است که نشان‌دهنده افزایش ۳۶ درصدی بازده کل است. این اتفاق با مقدار بهینه ضخامت لنز به ۸ میلی‌متر، قطر لنز به ۱۸ میلی‌متر و کاهش قطر لکه، حادث شد. شکل (۱۰) الف و ب به ترتیب، نتایج آشکارسازهای ورودی و خروجی فیبر را پس از بهینه سازی نشان می‌دهند. از مقایسه این شکل با شکل (۸)، اصلاح پروفایل شدت و کوچکتر شدن اندازه لکه در نقطه کانونی واضح است.

[28] Xia
[29] Local Optimization
[30] Hammer Optimization
[31] Global Optimization
[32] Non sequential trace ray

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]



شکل (۱۰): نتایج آشکارسازها الف. قبل و ب. بعد ازفیبر نوری پس از بهینه سازی

۵-۳ مقایسه قبل و بعد از بهینه‌سازی:

همانطور که از شکل های مربوط به تزویج نور قبل و بعد از بهینه سازی مشخص است، بعد از بهینه‌سازی، ضخامت و قطر لنز افزایش یافته که این موضوع باعث متمرکز شدن بیشتر نور به درون فیبر نوری شده است. با بهینه سازی سیستم بازده ۳۶ درصد بهبود یافت.

در جدول (۴-۲) نیز مقایسه‌ای بین پارامترهای مختلف سیستم روشنایی روز فیبر نوری قبل و بعد از بهینه‌سازی انجام شده‌است.

جدول ۳: مقایسه پارامترهای مختلف سیستم سیستم روشنایی روز فیبر نوری قبل و بعد از بهینه‌سازی

	قطر لنز (میلی-متر)	ضخامت لنز (میلی-متر)	توان خروجی (وات)	توان ورودی (وات)
قبل از بهینه‌سازی	۳۰	۳	۲۲	۲۴
بعد از بهینه‌سازی	۱۸	۸	۳۰	۳۵

۴- نتیجه‌گیری

سه نوع فیبر پلیمری که در این سیستم‌ها کارایی بیشتری دارند در محیط نرم افزار OptiFiber طراحی و تجزیه و تحلیل شدند. این سه نوع فیبر جنس Core و Clad متفاوتی داشتند که پس از آنالیز داده‌های بدست‌آمده از نرم افزار Optifiber، فیبری که از هسته PS و پوشش PMMA بود به عنوان فیبر مناسب تر انتخاب شد، این فیبر تعداد مدهایی بیشتری و طیف وسیع‌تری را منتقل می‌نمود. در ادامه نیز فیبر مدل از لحاظ پاشندگی، افت و مد های تابشی مورد بررسی قرار گرفت. یک فیبر به قطر ۱ میلی متر در فاصله کانونی لنز فرنل با قطر ۳ سانتی متر و فاصله کانونی ۳/۸ سانتی‌متر قرار داده شد و یک منبع ۱۰۰ وات به عنوان نور خورشید مطابق استاندارد AM 1.5 نیز در فاصله ۵۰ سانتی متری لنز قرار گرفت تا نقش خورشید را ایفا کند. این چیدمان در نرم افزار Zemax پیاده سازی شد. پس از بررسی نتایج آشکارسازها مشخص شد که با این طراحی ۲۴ وات نور به درون فیبر تزویج می‌شود و ۲۲ وات از فیبر خارج می‌شود در حالیکه افت انتقال در فیبر در حدود ۰/۴ *dB/m* است. این نتایج نشان دهنده بازده ۲۲ درصدی است. همین چیدمان در آزمایش بازده ۲۱ درصدی را نشان می دهد که با ۱ درصد خطا روش را تایید می کند. به منظور افزایش تزویج نور به درون فیبر، برای افزایش بازده، بهینه‌سازی پارامترهای لنز فرنل انجام شد. جهت بهینه سازی از بهینه سازی جهانیکه بر اساس الگوریتم ژنتیک است، بهره برده شد. قابل ذکر است که در جدول Merit Function نیز از توابعی استفاده شد که به کمک آن‌ها بتوان میزان توان ورودی و قطر لکه[۲۷] را بهبود بخشید. پس از بهینه‌سازی با افزایش ضخامت و قطر لنز و کاهش قطر لکه، میزان توان ورودی و خروجی نور به فیبر به ترتیب به ۳۵ و ۳۰ وات افزایش پیدا کرد و در حقیقت این کار باعث بهبود ۳۶ درصدی بازده شد. نتیجه حاصل نشان از بهره وری در سیستم های روشنایی روز به کمک نرم افزارهای قدرتمند برای کاهش خطای مجاز در ساخت و صرفه جویی در زمان و هزینه، دارد. هر چه بازده بیشتری از این سیستم ها انتظار رود، به یقین به همان اندازه مصرف سوخت های فسیلی و تولید گاز های گلخانه ای کاهش می‌یابد. همچنین، بازده مناسب، اشتیاق کاربردن به جایگزینی این نوع سیستم را در کشاورزی مسقف، منازل، کارخانه ها و غیره افزایش می‌دهد.

مراجع

Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45*, 244-248.

Al-Amayreh, M. I., Alahmer, A., & Manasrah, A. (2020). A novel parabolic solar dish design for a hybrid solar lighting-thermal applications. *Energy Reports, 6*, 1136-1143.

Bhowmik, K., & Peng, G.-D. (2019). Polymer optical fibers. *Handbook of Optical Fibers*, 1-51.

Bureau, C. (2022). *Releases New U.S. Population Estimates by Age*.

[27] Spot Radius

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]

gov/newsroom/press-releases/2022/population-estimates-age-sex.html
Council, U. G. B. (1995). Green building rating systems-draft recommendations for a US rating system. *Bethesda, Md.: US Green Building Council*.

Driggers, R. G. (2003). *Encyclopedia of Optical Engineering: Las-Pho, pages 1025-2048* (Vol. 2). CRC press.

Han, H. J., Riffat, S. B., Lim, S. H., & Oh, S. J. (2013). Fiber optic solar lighting: Functional competitiveness and potential. *Solar Energy*, *94*, 86-101.

IEA. (2021). *Net Zero by 2050*. https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050
Kumar, V., Shrivastava, R., & Untawale, S. (2015). Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *44*, 376-390.

C., Earl, D. D., Beshears, D. L., Lapsa, M. V., Maxey, L.

Ward, C. D., & Parks, J. E. (2007). Hybrid solar lighting provides energy savings and reduces waste heat. *Energy Engineering*, *104*(4), 7-20.

Maxey, L. C., Parks, J., Beshears, D., Earl, D., Lapsa, M., & Muhs, J. (2007). Spectral Transmission of a Solar Collector and Fiber Optic Distribution Hybrid Lighting System. Energy Sustainability,

Technical Documentation Optiwave. (2014). *OptiFiber Optical Fiber Design Software*. In Optiwave Systems Inc. https://optiwave.com/wp-content/uploads/2014/08/fiber-cad.pdf
Potrč, S., Čuček, L., Martin, M., & Kravanja, Z. (2021). Sustainable renewable energy supply networks optimization–The gradual transition to a renewable energy system within the European Union by 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *146*, 111186.

Radiant Vision Systems, L. (2022). *Radiant Zemax is Now Radiant Vision Systems*. https://www.radiantvisionsystems.com/about-us/news/radiant-zemax-now-radiant-vision-systems
Sreelakshmi, K., & Ramamurthy, K. (2022). Review on fibre-optic-based daylight enhancement systems in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *163*, 112514.

Ullah, I. (2014). Daylight for healthy indoor environment and energy benefits. *International journal of ophthalmology an eye*, *2*, 1-2.

Xia, L., Wei, G., Wang, G., Cui, L., & Du, X. (2023). Research on combined solar fiber lighting and photovoltaic power generation system based on the spectral splitting technology. *Applied Energy*, *333*, 120616.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.3.2.5]