مروری بر توسعه‌ی سامانه‌های روشنایی خورشیدی

احسان کریمی یایشهری[۱]، شیوا گرجیان[۲*]، سعید مینایی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس: Karimiehsan@modares.ac.ir
۲. استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس: Gorjian@modares.ac.ir
۳. استاد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس: Minaee@modares.ac.ir

چکیده

با توسعه‌ی سامانه‌های روشنایی خورشیدی می‌توان نور بیشتری را برای روشنایی مورد نیاز در بخش‌های مختلف فراهم کرد. در مطالعه‌ی پیش رو به بررسی و مرور سامانه‌های نورپردازی پرداخته شده است. در این راستا سامانه‌های روشنایی خورشیدی در انواع فعال، غیرفعال، هیبریدی و غیرهیبریدی مورد مطالعه قرار گرفتند. هزینه‌ی بالا و نحوه‌ی استفاده از این سامانه‌ها در محیط‌های مختلف جزء بزرگ‌ترین چالش‌ها در جهت توسعه آن‌ها هست. بااین‌حال، فناوری‌های فعال مجهز به ردیابی خورشیدی هنوز در محوریت اصلی استفاده‌ی این سامانه‌ها هستند. آشنایی با مزایای سامانه‌های مختلف نورپردازی در مقیاس آزمایشگاهی و سامانه‌های روشنایی تجاری‌سازی شده مفید خواهد بود. علاوه بر این، با بهره‌مندی از روش‌های متفاوتی که در حوزه‌ی سامانه‌های نورپردازی مقیاس آزمایشگاهی معرفی شده است، می‌توان از این روش‌ها در توسعه‌ی سامانه‌ها و طرح‌های روشنایی خورشیدی استفاده کرد. شایان ذکر است با بهره‌مندی از نتایج پژوهش‌های مورد بحث در این مقاله، تحقیقی در همین حوزه در دست اجرا می‌باشد که در متن مقاله بدان اشاره شده است.

کلمات کلیدی: *سامانه‌های روشنایی خورشیدی؛ لوله‌ی نوری؛ فیبر نوری؛ نمونه‌ی آزمایشگاهی*

*نویسنده مسئول
Gorjian@modares.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها در مورد عملکرد و کاربرد انرژی خورشیدی در حال رشد بوده و استفاده از آن‌ها به یک گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر تبدیل شده است. این مطالعات کاربردهای اصلی انرژی خورشیدی و خصوصیات طیفی، ازجمله‌ی آن‌ها تولید انرژی از نور خورشید [1]، سامانه‌های روشنایی روزانه [5]–[2]، درمان بیماری‌های روانی [6]، درمان یا پیشگیری از بیماری‌های انسانی[8] ,[7]، حوزه‌های غیرتصویربرداری[1] [9] و دیگر کاربردهای مرسوم را نشان می‌دهد. سامانه‌های روشنایی خورشیدی که در آن‌ها نورپردازی مطرح هست، از زمان قدیم در سازه‌های مسکونی مورد استفاده قرار می‌گرفت. قبل از قرن شانزدهم و هفدهم نورپردازی داخلی از طریق پنجره‌ها و دریچه‌های سقفی تأمین می‌شد. در قرن بیستم باوجود بسیاری از ساختمان‌های مرتفع و فضاهای زیرزمینی تاریک، روشنایی توسط چراغ‌های برقی تأمین می‌شد. در پژوهش‌های اخیر نشان داده شده است که روشنایی ۴۰ درصد از انرژی مصرفی یک ساختمان را تشکیل می‌دهد [5] که در این بین ساختمان‌های تجاری بیشترین سهم را داشته‌اند. بر اساس منابع آماری، حدود ۱۹ درصد انرژی در جهان به‌صورت برق مصرف می‌شود و در این بین تقریباً ۳۸ درصد از انرژی ایالات متحده در ساختمان‌ها مصرف می‌شود [10]. بر این اساس اگر میزان انرژی مصرفی در روشنایی الکتریکی کاهش پیدا کند، می‌توان از اتلاف انرژی و ایجاد صدمات غیرضروری در محیط‌زیست جلوگیری کرد [12] ,[11].

پروژه‌ی آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) به نام پروژه‌ی ۲۱، که متشکل از تعداد زیادی فعالیت تحقیقاتی روشنایی خورشیدی است، در سال ۱۹۹۵ در کشور استرالیا، آمریکای شمالی و اروپا انجام شد [13]. موضوعات مورد بحث در این پژوهش عبارت‌اند از: سامانه‌های روشنایی خورشیدی، کنترل روشنایی و روش‌های ارزیابی نور خورشیدی در ساختمان و چند مطالعه‌ی موردی بود. موضوع اصلی این پروژه شامل طاقچه‌های نوری[2]، نورگیر کرکره‌ای[3]، نورگیرهای منعکس‌کننده و پخش‌کننده[4]، پرده‌های غلتکی[5] و دریچه‌های سقفی سایه‌دار[6] بود که به‌عنوان دستگاه‌های روشنایی غیرفعال[7] و یا پنجره‌های شیشه‌ای کار می‌کنند. این اشیاء در غالب یک سامانه‌ی هدایت نور که سرآغاز شکل-های جدید سامانه‌های روشنایی خورشیدی هستند، از طریق مواد و اجزای نوری غیر مصرف‌کننده انرژی برای هدایت نور ارائه شدند [13] ,[5]. با توجه به موقعیت جغرافیایی، شرایط جوی و شرایط آب و هوایی، دستگاه هدایت‌کننده‌ی نور خورشید ممکن است در طول روز کیفیت تابش متفاوتی را فراهم کنند [14]. در این حالت، تغییر زاویه‌ی تابش باعث ایجاد تغییر در توزیع نور می‌گردد و منجر به ناکارآمدی دریچه‌ی سقفی یا سایر سامانه‌های هدایت نور (LGS)[8] می‌شود ، بنابراین نور در روز کافی نیست. به‌منظور دستیابی کارآمدتر به نور در روز، اجزای نوری باثبات‌تر و دستگاه‌های فعال بررسی شدند. اجزای نوری رایج در سامانه‌های روشنای خورشیدی عبارت‌اند از: لوله‌های بازتابی بالا [17]–[15]، لنزهای فرسنل[9] [20]–[18]، لنزهای فرسنل خطی [22] ,[21]، فیبر نوری با مواد مختلف [18]، راهنمای نور [23]، متمرکزکننده سهموی [25] ,[24]، متمرکزکننده سهموی مرکب (CPC) [27] ,[26]، دیش متمرکزکننده [1]، آینه‌ی سرد [24]، فیلترکننده اشعه‌ی IR[10] [26] ,[18]، آینه‌ی داغ [25] و ساختارهای منشوری [28]. دستگاه‌های فعال[11] وظیفه‌ی تغییر جهت متمرکزکننده را دارند و شامل یک سامانه‌های ردیابی خورشیدی می‌باشند [31]–[29]. سامانه‌های فعال برای بهبود بازده کلی سامانه‌ی روشنایی توسعه داده‌شدند و شامل یک فاکتور (ضریب) نور روز (DF)[12] هستند. از شاخص ضریب نور برای تعیین عملکرد یک سامانه‌ی روشنایی خورشیدی استفاده می‌شود. فاکتور یا ضریب تابش روز برابر با نسبت شار تابشی فضای داخلی به فضای بیرونی در همان مختصات افقی است [5]. یک سامانه‌ی نورپردازی خوب نیاز به ۲ درصد ضریب روز تحت شرایط استاندارد کمیسیون بین‌المللی روشنایی (CIE) دارد [32]. هرچه شاخص

[1] Non-imaging field
[2] Light shelves
[3] Louvers
[4] Diffusing reflecting louvers
[5] Roller blinds
[6] Shaded skylights
[7] Inactive
[8] Light Transport System
[9] Fresnel
[10] IR filer
[11] Active
[12] Daylight factor

نور روز برای سامانه بیشتر باشد، می‌تواند از آن به‌جای منابع روشنایی الکتریکی بیشتری جایگزین کرد. علاوه بر ضریب نور، DA[1] و UDI[2] نیز روش‌هایی برای ارزیابی نور روزانه هستند. DA و UDI معیارهای دینامیک روشنایی خورشید هستند. تفاوت بین معیارهای تابش نور استاتیک و دینامیک در این است که استاتیک بر اساس شرایط ثابت آسمان است، درحالی‌که دینامیک مربوط به شرایط واقعی آب‌وهوا، رخدادهای آب و هوایی و سری زمانی بر اساس سال است [33]. معیارهای تابش نور به‌طور خاص برای ارزیابی راحتی[3] افراد حاضر و میزان تابش خورشیدی در دسترس، در محل کار است [33] ,[32]. به‌طور خلاصه، DF یک روش متداول برای پیش‌بینی نور مورد انتظار آفتاب با استفاده از روشنایی میانگین در سطح افق است که نمی‌تواند در شرایط واقعی به کار رود. بااین‌حال، اندازه‌گیری آن راحت و سریع است و هنوز هم روشی برای ارزیابی عملکرد بسیاری از سامانه‌های روشنایی خورشیدی است. سامانه‌های مورد نظر به قسمت‌های مختلف تقسیم می‌شوند، نور آفتاب توسط سامانه‌ی دریافت‌کننده جمع شده و از طریق پخش‌کننده‌ی نور برای روشنایی به فضای داخل هدایت می‌گردد. هدف از ارائه‌ی این مقاله، مروری بر پژوهش‌های موجود در حوزه‌ی توسعه و ارزیابی سامانه‌های روشنایی خورشیدی در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد. در طول سال‌های اخیر از این سامانه‌ها به‌عنوان چشم‌اندازی امیدبخش در زمینه‌ی سامانه‌های روشنایی خورشیدی و حوزه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر یاد شده است. شایان ذکر است، علاوه‌بر موضوعات فوق به مواردی همچون سامانه‌های منفعل و فعال و سامانه‌های فعال و غیرفعال هیبریدی نیز اشاره شده است.

روشنایی خورشیدی

پیشرفت در تحقیقات خورشیدی باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهبود رفاه انسان، بهبود عملکردهای فیزیولوژیکی و جلوگیری از بیماری می‌شود. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که ملاتونین[4] بدن در اثر قرار گرفتن در معرض نور آفتاب مهار می‌شود، این امر به بهبود کارایی و ترشحات هورمونی شبانه کمک می‌کند و باعث می‌شود افراد استراحت کافی داشته باشند. تحقیقات مربوط به تولید ملاتونین بدن نشان می‌دهد که با قرار گرفتن در معرض نور بیشتر یا برابر ۲۵۰۰ لوکس می‌تواند به‌طور مؤثری ترشح ملاتونین توسط غده صنوبری را مهار کرد [34]. ملاتونین وقتی بدن به استراحت نیاز دارد ترشح می‌شود. تابش اشعه‌ی ماوراءبنفش B[5] (این اشعه به اشعه‌ی آفتاب‌سوختگی معروف است) در ساعات صبح باعث می‌شود از ترشح این هورمون جلوگیری شده و بازده فعالیت‌های کاری را افزایش دهد. بعد از غروب آفتاب این اشعه کمتر هست و ملاتونین شروع به ترشح می‌کند که می‌تواند به خواب شبانه کمک کند. UV-B همچنین به بدن کمک می‌کند تا به‌طور طبیعی ویتامین D-3 تولید کند. بیش از ۹۰ درصد اشکال اصلی ویتامین D-3 وابسته به نور خورشید است و تنها ۱۰ درصد از آن‌ها از گلیسیرین ماهی، پرتقال یا مواد غذایی دیگر تهیه می‌شود. در کل، ماوراءبنفش فواید و مضراتی دارد، استفاده محدود و بدون قرار گرفتن در معرض بیش‌ازحد آن، می‌تواند به‌طور مؤثر سلامتی انسان را ارتقا بخشد [3].

کاربردهای روشنایی خورشیدی

نور خورشید می‌تواند برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد و ازنظر صرفه‌جویی در انرژی مؤثر واقع شود. در فضای داخلی، بخشی از منبع روشنایی توسط پنجره‌های معمولی و پنجره‌ی سقفی و سامانه‌های نوری عادی از نور آفتاب تأمین می‌شود. بسیاری از مؤسسات معماری مانند (LEED)[6] به اهمیت نور روزانه تأکید می‌کنند. عوامل جوی، موقعیت جغرافیایی و سایه‌ی سازه‌های مرتفع و غیره، باعث می‌شود

[1] Daylight Autonomy
[2] Useful Daylight Illuminance
[3] Solar comfort
[4] Melatonin
[5] UV-B
[6] Leadership in Energy and Environmental Design

نور آفتاب در دسترس نباشد. کم و زیاد بودن نور در یک محل باید با توجه به تابش در فضای داخلی، کیفیت آن و تأمین پیوسته‌ی نور مشخص شود [35]؛ در بحث نور خورشید نه‌تنها تأمین نور اهمیت دارد، بلکه مقدار لازم و کافی بودن نور نیز مورد بحث است. برای کشورها یا مناطق مختلف، روش‌ها و راهکارهای کاربردی مختلفی وجود دارد. نورگیرهای سقفی و پنجره‌ها رایج‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های تأمین روشنایی می‌باشند. مزیت آن‌ها وجود اشعه‌ی مستقیم و پراکنده آفتاب است و نقطه‌ی ضعف آن، گرما و امواج الکترومغناطیسی ایجادشده توسط نور آفتاب می‌باشد.

توسعه و پیشرفت سامانه‌های روشنایی خورشیدی

نورپردازی برقی در سال ۱۹۵۰ در مقیاس گسترده ارائه شد، که موجب تغییر نورپردازی داخلی شد [36]. سامانه‌ای که بتواند نور خورشید را از بیرون به محیط داخلی منتقل کند، سامانه‌ی روشنایی روز نامیده می‌شود. سامانه‌های نورپردازی خورشیدی را می‌توان با سامانه‌ی تابش نور استاتیک که از عناصر هدایت‌کننده نور خارجی مانند شیشه، پنجره سقفی و حفاظ‌های خورشیدی تشکیل‌شده است ارائه داد؛ اما سامانه‌ی روشنایی خورشیدی پویا نیز وجود دارد که از مؤلفه‌های پویا برای جبران کمبود روشنایی در روز استفاده می‌کند.

در یک پژوهش [37] سامانه‌ی خورشیدی هدایت نور لوله‌ای (TDGS)[1]، سامانه‌ی روشنایی هیبریدی (HLS)[2] و سامانه‌های یکپارچه‌ی خورشیدی بررسی شدند؛ که در آن سامانه‌های هیبریدی می‌توانند کیفیت نور بهتری نسبت به سامانه‌های لوله نوری فراهم کنند. نوآوری و هزینه پایین سامانه‌های هیبریدی را قابل اعتمادتر کرده است. همچنین در [29] مطالعه‌ای که شامل سامانه‌های نورپردازی مانند سامانه‌های لوله نوری و سامانه‌های آینه‌ای می‌باشد، پارامترها و اشکال لوله‌ی نوری بررسی و تجاری کردن سامانه‌های لوله نوری را ارائه و محدودیت‌های پنجره‌های سنتی برای تامین نور آفتاب و میزان نور موردنیاز را نشان داده شد. همچنین در پژوهشی دیگر، مشکلات موجود در سامانه‌ی نوآوری روزانه[3] مورد بحث قرار گرفت که نحوه‌ی افزایش کیفیت نور روشنایی داخلی توسط آن‌ها را بیان می‌کند و هم‌زمان اظهاراتی را در مورد تجاری‌سازی آن‌ها ارائه می‌دهد. سامانه‌های لوله نوری دارای هزینه اولیه پایین‌تر و کیفیت بالای نور می‌باشند، اما محدودیت فضا دارند و در خصوص سایر سامانه‌ها به دلیل هزینه اولیه بالا مانند هلیوس[4]، پارانس[5] و هیمیواری[6]، ساخت آن‌ها دشوار است.

شکل ۱. تصویر سامانه‌های هیمیواری، پارانس و هلیوس به ترتیب از راست به چپ [3].

هرچه سامانه پیچیده‌تر باشد، مدت برگشت هزینه‌ی اولیه طولانی‌تر است. به‌عنوان‌مثال، دوره‌ی بازپرداخت برای سامانه‌های لوله‌ی نوری، ۱۲ سال است، اما برای بعضی‌ها ممکن است تا بیش از ۲۰ سال هم باشد [3]. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده‌شده است، سامانه‌های نوآورانه‌ی روشنایی خورشیدی (IDS)[7] تجاری با توجه به سال نصب، ترکیب و هزینه آن سازماندهی شده‌اند.

[1] Tubular Daylight Guidance System (TDGS)
[2] Hybrid lighting system (HLS)
[3] Innovation Daily System (IDS)
[4] Heliobus
[5] Parans
[6] Himawari
[7] Innovative Daylighting System

جدول ۱. سامانه‌های روشنایی فناورانه تجاری (IDS).

نام سامانه [3]	سال نصب [4]	توضیحات [4]	هزینه اولیه [3]
Himawari	۱۹۷۰	لنزهای فرسنل و فیبر نوری کوارتز	بالا
Monodraught	۱۹۷۴	لوله خورشید، گیرنده نور آفتاب	پایین
Solatube	۱۹۸۷	لوله‌ی خورشیدی با گنبد نوری	پایین
Heliobus	۱۹۹۵	هلیوستات و سامانه‌های لوله‌ی خورشیدی	بسیار بالا
Parans	۲۰۰۴	لنزهای فرسنل کوچک و کانال‌های فیبر نوری	بالا
Sundolier	۲۰۰۴	نورگیر با آینه‌ها و کانال نوری	بالا
Velux	۲۰۰۵	سامانه‌های تونل خورشید با گنبد خورشیدی ولوله‌های مستطیلی	بالا
Sunportal	۲۰۱۲	هلیوستات با متمرکزکننده‌ی با تمرکز بالا	بسیار بالا
SunCentral	۲۰۱۳	نورگیر با آینه‌های خمیده	متوسط

سامانه‌های روشنایی خورشیدی تجاری مشکل تمیزکاری نیز دارند. ازآنجاکه بیشتر سامانه ها از مواد آینه‌ای یا شیشه تشکیل شده‌اند، تجمع گرد و غبار و خاک می‌تواند به کاهش بازده نوری و انتقال منجر شود. در یک پژوهشی [38] روش‌هایی برای تمیز کردن پیشنهاد شد. شیوه‌های توصیه‌شده برای تمیز کردن سامانه‌ها در این پژوهش شامل دمیدن هوا، پاشش آب با فشار بالا، تمیز کردن با برس، کشیدن برس نرم با چرخش روی سطح متمرکزکننده و پاک کردن معمولی آن می‌باشد. آلودگی سطح سامانه‌های روشنایی خورشیدی باعث کاهش کارایی آن‌ها می‌شود، درحالی‌که تمیز کردن پتانسیل کار را افزایش می‌دهد. نایر و همکاران[1] سامانه‌های هدایت و انتقال نور، سامانه‌های روشنایی هیبریدی وسامانه‌های یکپارچه را معرفی کردند [19]. این پژوهش شامل سامانه‌های هدایت نور برای شیلدهای نور خورشیدی[2] که مناسب برای استفاده در مناطق گرمسیری با تابش مستقیم خورشیدی هستند، می‌باشد. این درحالی است که برای جمع‌آوری نور به مقدار زیادی فضای دهانه نیاز است. سامانه‌های یکپارچه مانندگنبدهای خورشیدی عمدتاً از پخش‌کننده‌ی نور استفاده می‌کنند که اگر در مناطق استوایی مورد استفاده قرار گیرد، ممکن است گرمای ایجاد شده باعث مشکلات شود. تابش و روش‌های تأمین روشنایی نیز بخش مهمی از سامانه‌های روشنایی خورشیدی هستند. در روشنایی خورشیدی باید ارتفاع خورشیدی و زاویه‌ی آزیموت را در نظر گرفت [5]. درصد پیشنهادی ضریب نور روزانه (DF) برای انجام امور مختلف در جدول ۲ توسط استین ۱۹۹۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. ضریب نور روز توصیه شده توسط استین ۱۹۹۲ [5].

کارها	ضریب نور (DF)
کارهای معمولی دیداری مانند خواندن، اجرا و کار آسان در دفتر	۱,۵ – ۲,۵ درصد
کارهای نسبتاً دشوار، مانند خواندن طولانی‌مدت، کارهای گرافیکی و تندنویسی، کار ابزار ماشینی معمولی.	۲,۵ – ۴ درصد
کارهای دشوار و طولانی مانند رسم، تصحیح نمونه‌ی نسخه‌برداری‌شده، کارهای ماشینی ظریف و بازرسی‌های ظریف.	۴ – ۸ درصد

سامانه‌های روشنایی خورشیدی نه‌تنها روش‌های نوآورانه‌ای هستند، بلکه از اجزای نوری و مکانیکی مانند لوله‌های نوری، فیبرنوری، متمرکزکننده‌های فعال، متمرکزکننده‌های غیرفعال و سامانه‌ی ردیابی نیز استفاده می‌کنند؛ بخش‌های فعال، سامانه های روشنایی خورشیدی را قادر می‌سازد تا کارایی و کاربرد واقعی‌تری را داشته باشند. در آینده از سامانه‌های روشنایی خورشیدی نه‌تنها برای جمع آوری و انتقال نور

[1] Nair et al

[2] light sun shields (LTS)

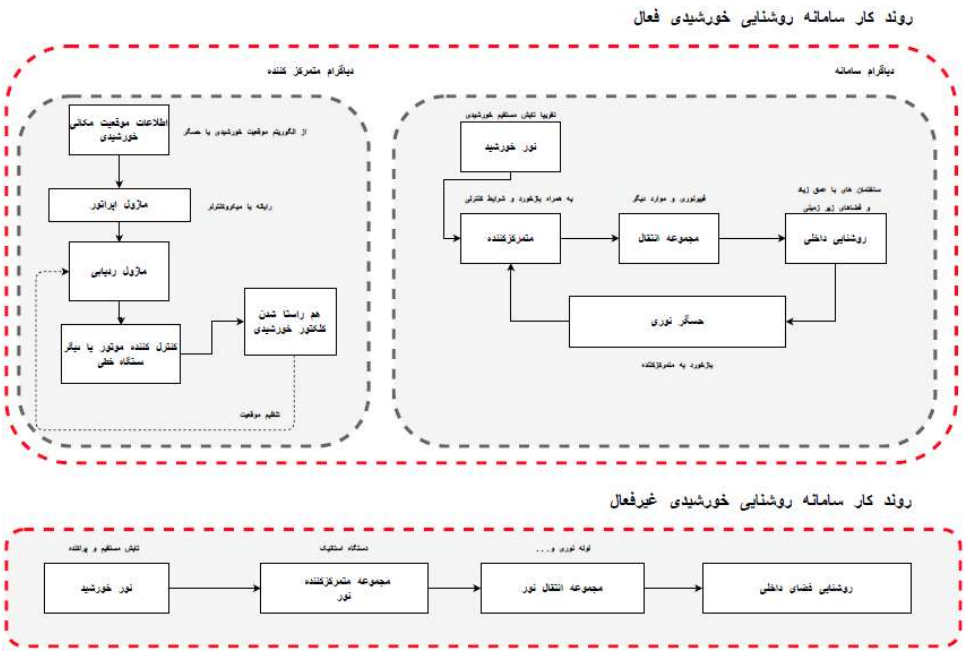
خورشید استفاده می‌شود، بلکه به احتمال زیاد شاهد ترکیبی از آن‌ها و نسل سامانه‌های فتوولتائیک (PV)، یعنی استفاده همزمان از نور مستقیم خورشید و تولید برق فتوولتائیک خواهیم بود که پس از غروب آفتاب، انرژی ذخیره‌سازی شده در روز می‌تواند روشنایی مصنوعی در اتاق را تأمین کند [39]. در پژوهشی دیگر که بر اساس متمرکزکننده‌ی کاسگرین[1] به همراه تولید برق فتوولتائیک بود، هدف استفاده از نور آفتاب برای تولید هم‌زمان برق فتوولتائیک و نورپردازی و استفاده از الکتریسیته تولید شده برای نور مصنوعی بود که نتیجه‌ی آن، استفاده بهینه از روشنایی را به همراه داشت [24]. اولین سامانه‌ی روشنایی خورشیدی تجاری در دهه ۱۹۷۰ توسعه یافت که هیماواری از ژاپن بود. هزینه‌ی اولیه بالا، هزینه بالای نصب در مقایسه با روشنایی الکتریکی و عدم پیوستگی و کم بودن نور خورشید در روز باعث شد که دید در قسمت روشنایی محدود باشد. وونگ و همکاران[2] علاوه بر سامانه‌های روشنایی خورشیدی تجاری، نمونه‌های اولیه و آزمایشگاهی را بررسی و چالش‌ها و مشکلات موجود برای بسیاری از سامانه‌های روشنایی خورشیدی تجاری را از نظر نصب، ارزیابی کرده و روش‌های شبیه‌سازی را ارائه دادند. بااین‌حال، هنوز یک نقشه‌ی راه کامل برای سامانه‌های نمونه‌ی اولیه[3] و آزمایشگاهی وجود ندارد [4]. عملکرد بعضی از سامانه‌های آزمایشگاهی حتی بهتر از بعضی موارد تجاری در مناطق و محیط‌های خاص است. همان‌طور که گفته شد، مناطق مختلف دارای محدودیت-هایی هستند که هر سامانه‌ی روشنایی خورشیدی با آن روبه‌رو هست. به‌طورکلی نورپردازی برقی هم در فضای داخلی و هم در فضای خارجی قابل نصب است به‌شرط آن‌که برق وجود داشته باشد، اما در سامانه‌های روشنایی خورشیدی باید طول و عرض جغرافیایی را در نظر گرفت و یا اینکه آیا محیط نصب برای سامانه مناسب است یا خیر. به‌عنوان‌مثال، یک منطقه با عرض جغرافیایی کم برای نصب سامانه‌های لوله نوری مناسب است، درحالی‌که یک لوله‌ی نوری در عرض‌های جغرافیایی بالا برای دریافت نور آفتاب با زاویه کم به یک طراحی خاص نیاز دارد [40]. به‌طور عمده تحت شرایط آسمان ابری و برای مکان‌هایی با سازه‌های مرتفع، سامانه‌هایی که قابلیت ردیابی خورشید را دارند مناسب‌تر هستند. این‌ها عوامل و مشکلات موجود در توسعه‌ی سامانه‌های روشنایی خورشیدی هستند. با این وجود هنوز مطالعه و بررسی سامانه‌ی نورپردازی خورشیدی ارزشمند می‌باشد. نمودار ۱ روند و حجم تحقیقات سامانه‌های روشنایی خورشیدی را در فاصله‌ی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ را نشان می‌دهد.

نمودار ۱. روند و حجم تحقیقات سامانه‌های روشنایی خورشیدی را در فاصله‌ی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ [39]

[1] Cassegrain
[2] Wong et al
[3] Prototype Systems

طبقه‌بندی سامانه‌های نورپردازی

تعداد سامانه‌های نورپردازی که شامل سامانه‌های روشنایی استاتیک، دستگاه‌های هدایت لوله‌ای، دستگاه‌های فعال و سامانه‌های هیبرید شده با روشنایی الکتریکی طی یک دهه‌ی گذشته افزایش‌یافته است. این سامانه‌ها را در دو گروه کلی دسته‌بندی می‌شوند. نوع اول بر اساس هدایت لوله‌ای (TDD)[1] می‌باشند که هزینه‌ی اولیه‌ی کم و کاربرد آسانی دارند و شامل نورپردازی هیبریدی سامانه‌های نوع یک با یک منبع الکتریکی نیز می‌باشد. برای نوع دوم، کاربرد و بازده سامانه‌های روشنایی فعال و سامانه‌های هیبریدی فعال با نور الکتریکی بحث خواهد شد. تفاوت بین فرآیند کار سامانه‌های نورپردازی منفعل و فعال در شکل ۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۲. مقایسه روند کار سامانه‌ی نورپردازی منفعل و فعال [39].

سامانه‌های نورپردازی منفعل (نوع یک)

سامانه‌های روشنایی خورشیدی که نیازی به مصرف انرژی ندارند سامانه‌های منفعل یا پسیو[2] نامیده می‌شوند که غالباً دستگاه‌های روشنایی لوله‌ای هستند که می‌توان آن‌ها را به سامانه‌ی هدایت نور خورشیدی لوله‌ای (TDGS)[3] یا سامانه‌های آنیدولیک[4] تقسیم کرد [41]. تفاوت این سامانه‌ها در این است که TDGS یک لوله‌ی نوری عمودی است و نور خورشید را از فضای بیرونی به هسته اصلی فضای داخلی منتقل می‌کند [17] ,[15]؛ درحالی‌که آنیدولیک یک لوله نوری افقی است که نور را از نمای بیرونی به فضای داخلی منتقل می‌کند [42] ,[4]. تغییر مسیر و جمع‌آوری نور که سامانه‌ی انتقال به فضای داخلی هدایت می‌کند، نوری را فراهم می‌کند که پنجره قادر به تأمین آن نیست. سامانه‌ی روشنایی لوله‌ی نوری یک دستگاه خطی است که از متمرکزکننده‌ی خورشیدی (گنبدی) [43]، لوله‌ی هدایت نور و دیفیوزر تشکیل شده است. گنبد از جنس مواد با انتقال بالای نور که اشعه‌ی ماوراءبنفش را فیلتر می‌کند [40]. این دستگاه در زوایه‌ی پایین تابش می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد و در زوایه‌ی تابش بالا قسمتی از نور خورشید را دست می‌دهد [44] ,[15]. کارایی دستگاه به زاویه برخورد، میزان بازتاب

[1] Tubular Daylight Device
[2] Passive
[3] Tubular Daylight Guidance Systems
[4] Anidolic systems

پوشش در داخل لوله و نسبت قطر به طول بستگی دارد. هرچه زاویه نور ورودی بیشتر باشد، تعداد بازتاب‌ها بیشتر و راندمان پایین‌تر است. در شکل ۳ شماتیک انتقال نور از بیرون به داخل ساختمان توسط سامانه‌ی روشنایی خورشیدی غیرفعال آورده شده است. المراوی و همکاران[1] در مورد دلایل کم شدن بازده این سامانه‌ها مواردی را به شرح زیر ارائه کردند [16]:

- تراکم خط لوله و تجمع گردوخاک؛
- عدم وجود کنترل بر روی سامانه‌ی هدایت نور لوله‌ای؛
- ضریب نور روز کمتر از ۲ درصد و کافی نبودن آن برای ایجاد یک فضای روشن؛
- استانداردی برای طراحی این سامانه‌ها ارائه نشده است.

شکل ۳. شماتیک انتقال نور از بیرون به داخل توسط سامانه‌ی روشنایی خورشیدی غیرفعال.

در یک پژوهش دیگر به توضیح برخی پارامترهای لوله نور اشاره شده است که برای بهبود بازده، بر اساس شرایط نور آسمان و تابش مستقیم خورشید مفید است [45]:

- استفاده از مواد با شفافیت بالا و با بازتابی کم (شیشه‌ای)؛ یک هندسه‌ی گنبدی بهتر از هندسه‌ی تخت و صاف است؛
- توصیه‌شده که سطح لامپ سقف داخلی به‌طور گرافیکی طراحی شود تا یکنواختی افزایش پیدا کند؛
- بازتاب داخل لوله‌ی نوری باید زیاد باشد و به سطح صافی نیاز دارد، لذا بهتر است برای آن از مواد آینه مانند استفاده شود؛
- هندسه نوری راهنمای نور لوله‌ای مستقیم با نسبت ۱ به ۱۰ قطر به طول توصیه می‌شود که حداکثر مجاز ۱ به ۲۰ است؛
- لوله‌های نوری با قطرهای کمتر از ۰,۲ متر به دلیل ایجاد ضایعات مواد ساخت و افت بیش از حد نور در داخل آن، مناسب نیستند؛
- سامانه‌های نور لوله‌ای برای تابش مستقیم خورشیدی بسیار مناسب هستند اما برای شرایط آسمان ابری، نور کم‌تری تأمین می‌کنند.

عملکرد سامانه‌ی لوله‌ی نوری نه‌تنها تحت تأثیر شرایط خاص خود سامانه است، بلکه توسط عواملی مانند شرایط آسمان، موقعیت خورشیدی و روشنایی بیرونی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد [46] ,[44]. یک پژوهش برای تعیین عملکرد سامانه‌ی لوله نوری در منطقه مدیترانه انجام شد

[1] AI Marwaee et al

و نتایج نشان داد که عملکرد لوله‌ی نوری تحت تأثیر نسبت قطر به طول و بازتاب آن قرار دارد [44]. در سامانه‌ای دیگر برای بهبود کارایی نوری خروجی، با استفاده از روکش آینه و افزودن سطح آلومینیومی (استفاده از روکش فویل آلومینیومی) در خروجی سامانه‌ی لوله‌ی نوری، نور خروجی از ۱۷۸ لوکس به ۳۵۰ لوکس افزایش یافت و سطح روشنایی موردنیاز در یک کلاس درس تأمین شد [40]. یون و همکاران[1] از لوله نوری شرکت SIT برای ساخت یک اتاقک آزمایش در کره جنوبی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که میزان نوری که از سامانه‌ی لوله‌ی نوری تأمین می‌شود، در یک روز ابری نسبت به روز روشن آسمان تقریباً ۴ برابر کمتر است. بنابراین، در هنگام نصب سامانه باید میزان روشنایی در دسترس محلی و شرایط آب و هوایی در نظر گرفته شود [46]. همچنین می‌توان گفت که شکل لوله نور نیز دلیل اصلی تأثیرگذار بر عملکرد سامانه است. در مطالعه‌ای دیگر پارامترهای لوله نوری (تهیه شده توسط شرکت SOLATUBE از ایالات متحده) در یک برنامه شبیه‌سازی قرار داده شد تا با تغییر عرض قسمت فوقانی، میانی و پایین لوله، به بهترین طراحی در عملکرد لوله نور برسد [47]. سامانه‌های لوله نوری هنوز یک وسیله‌ی محبوب در بخش سامانه‌های روشنایی خورشیدی هستند و هنوز هم پژوهش‌های بسیاری در خصوص تنظیم اجزای مختلف و شرایط آسمان انجام می‌شود. در جدول ۳ آزمایش‌های تجربی، از سامانه‌های نوع یک که در مقالات مورد بحث قرار گرفته است، نشان داده‌شده است. علاوه بر تأمین نور، سامانه‌های نورپردازی خورشیدی برای صرفه‌جویی در انرژی نیز مؤثر هستند. در پژوهشی دیگر با هدف دست‌یابی به روشنایی بهتر یک سامانه‌ی روشنایی خورشیدی لوله‌ای منفعل یا پسیو، با منابع نوری مصنوعی مانند LED هیبرید و یکپارچه شد [37]. سامانه‌های روشنایی هیبریدی نور آفتاب و منابع الکتریکی را در فضای داخلی فراهم می‌کنند و این دو را در یک لامپ ارائه می‌دهند. سامانه‌های روشنایی هیبریدی (HLS)[2] شامل بخش‌های زیر می‌باشد:

- دستگاه جمع‌آوری نور و هدایت نور آفتاب
- سامانه‌های روشنایی مصنوعی
- سامانه‌ی کنترلی و بخش روشنایی

ادامه‌ی فراگیر شدن منبع نور الکتریکی باعث افزایش مصرف انرژی الکتریکی می‌شود، اما می‌تواند به‌طور مؤثری سطح روشنایی داخلی را افزایش دهد. در پژوهشی به اهمیت صرفه‌جویی در انرژی در سامانه‌های روشنایی خورشیدی روزانه اشاره شد [48]. صرفه‌جویی در انرژی با استفاده از نور آفتاب با توجه به میزان نور خورشید که از پنجره یا پشت‌بام وارد فضای داخلی می‌شود، تعیین می‌گردد. روش کنترل صرفه‌جویی در مصرف انرژی تقریباً موارد زیر را شامل می‌شود:

- کنترل میزان روشنایی[3]
- کنترل روشن/خاموش
- کنترل پیوستگی میزان روشنایی[4]
- کنترل روشنایی خودکار[5]

در تحقیقی از سامانه‌ی لوله‌ی نوری منفعل یا پسیو با روشنایی الکتریکی استفاده شد [17]. آزمایش‌ها نشان داد که در آسمان صاف، میزان نور در لوله نوری می‌تواند به ۶۸۰۰ لومن برسد و این میزان از یک لامپ فلورسنت ۵۶ واتی بیشتر است. هنگامی که میزان نور خورشیدی از منبع نور الکتریکی بالاتر باشد، می‌تواند در کاهش مصرف انرژی مؤثر واقع شده و در حدود ۵۷ درصد زمان روشنایی الکتریکی و ۳۳۶ وات

[1] Yun et al
[2] Hybrid lighting systems
[3] Dimming control
[4] Continuous dimming
[5] Automatic dimming

در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند. در پژوهشی دیگر از سامانه‌ی لوله نوری برای روشنایی فضای پارکینگ زیرزمینی استفاده شد. هدف این بود که میزان روشنایی در حدود ۶۰ لوکس باشد، پس از شبیه‌سازی، نشان داده شد که می‌تواند مصرفی سالانه‌ی انرژی در حدود ۶۰,۴ درصد کاهش دهد [49].

جدول ۳. موارد تجربی ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی سامانه‌های هدایت نور لوله‌ای

منبع	محل انجام پژوهش	روش انجام	نوع سامانه	جزئیات سامانه
[15]	موسسه‌ی فناوری‌های هند (دهلی) ۲۰۱۸	شبیه‌سازی، آزمون تجربی	نوع یک	• گنبد (ضخامت ۳ میلی‌متر) • لوله (طول: ۰/۷ متر؛ قطر: ۲۳۰ میلی‌متر) • لوله توسط شرکت Solatube تهیه شده است • پخش‌کننده (ضخامت: ۰/۶۱ میلی‌متر؛ نوع الماسی) • اتاق آزمایش (۳ در ۳ در ۲/۵، چوبی)
[47]	فرانسه ۲۰۱۶	محاسبه، شبیه‌سازی، آزمون تجربی؛	نوع یک	• لوله نوری نوع MLP که روی سقف نصب می‌شود • پخش‌کننده از جنس PMMA
[50]	انگلستان ۲۰۰۲	آزمون تجربی	نوع یک	• لوله (طول: ۶۱۰ میلی‌متر، قطر: ۳۳۰ میلی‌متر) • اتاق آزمایش (۲ متر در ۱/۵ متر ساخته شده از باغ، لوله نوری در سطح سقف ۱۶۰۰ میلی‌متر نصب شده است)
[46]	کره ۲۰۱۰	آزمون تجربی	نوع یک	• لوله (ساخت شرکت SIT) • طول لوله‌ی نور ۱/۳۲ متر و قطر آن ۰/۶۵ متر (اتاق آزمایش (طول ۶ متر ؛ عرض ۶ متر؛ ارتفاع ۴ متر، بدون پنجره)،
[44]	یونان ۲۰۱۷	آزمون تجربی	نوع یک	• طول لوله نور ۲/۶ متر و قطر آن ۰/۳ متر است • اتاق آزمون (طول ۵/۷۶ متر، عرض ۲/۷۵ متر، ارتفاع ۲/۳۵ متر، بدون پنجره) پخش‌کننده‌ی نور منشوری (بازده انتقال نور ۰/۸)
[51]	ایران ۲۰۱۶	آزمون تجربی	نوع یک	• متمرکزکننده‌ای که در نمای بیرونی نصب شده است • مجرای یا داک افقی • توزیع برای فضای داخلی
[40]	آفریقای جنوبی ۲۰۱۵	آزمون تجربی	نوع یک	• گنبد پلکسی‌گلس به قطر ۲۵۰ میلی‌متر • لوله‌ی آینه‌ای ۴۰۰ میلی‌متری با ۹۰ درصد بازتابی نوری • دیفیوزر منشوری پلی کربنات

سامانه‌های نورپردازی فعال (نوع دوم)

سامانه‌ی روشنایی فعال دستگاهی است که برای استفاده در فرآیند جمع‌آوری نور خورشید به انرژی نیاز دارد و از ساختارهای مکانیکی برای تغییر مسیر یا جمع‌آوری نور استفاده می‌کند. به‌طورکلی سامانه های روشنایی خورشیدی بر اساس داشتن یا نداشتن قابلیت ردیابی در پنج نوع دسته‌بندی می‌شود: ردیابی فعال، منفعل، نیمه منفعل، دستی و زمانی [52]؛ که در آن‌ها ردیابی به‌صورت تک‌محوره و یا دومحوره انجام

می‌پذیرد. تک‌محور، به‌صورت افقی در جهت ردیابی خورشید می‌چرخد. دو محوره در مسیرهای افقی و عمودی چرخانده می‌شود تا موقعیت خورشیدی را ردیابی کند. رایج‌ترین فناوری ردیابی، چرخیدن در جهت تغییر زاویه با افق و ردیابی ارتفاع آزیموت است [53]. جدول ۴ روش‌های ردیابی، انواع، عناصر و اهداف سامانه‌های فعال نورپردازی را نشان می‌دهد.

جدول ٤. روش‌های ردیابی، انواع، عناصر و اهداف سامانه‌های فعال نورپردازی

منبع	سال	نوع ردیابی	جزء متمرکزکننده و انتقال دهنده	هدف
[24]	۲۰۱۳	ردیابی دومحوره	متمرکزکننده سهموی؛ فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[29]	۲۰۱۰	ردیابی دومحوره	آینه‌های منعکس‌کننده؛ فضای خالی	هدایت نور
[54]	۲۰۱۸	ردیابی دومحوره	آینه‌های منعکس‌کننده؛ فضای خالی	هدایت نور
[55]	۲۰۱۶	ردیابی دومحوره	متمرکزکننده سهموی مرکب؛ فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[23]	۲۰۱۶	شبیه‌سازی ردیابی	لنز فرسنل و هدایت کننده پرتو؛ فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[31]	۲۰۱۷	ردیابی دومحوره	آینه‌های منعکس‌کننده؛ فضای خالی	هدایت تابش خورشیدی
[25]	۲۰۱۷	ردیابی دومحوره	متمرکزکننده آینه‌ای تخت	هدایت و افزایش تراکم نور
[56]	۲۰۱۳	ردیابی دومحوره	لنزهای متمرکزکننده؛ فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[57]	۲۰۱۹	ردیابی دومحوره	متمرکزکننده سهموی، لوله‌ی نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[58]	۲۰۱۸	ردیابی دومحوره	لنز فرسنل، فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[59]	۲۰۱۷	ردیابی تک‌محوره	متمرکزکننده سهموی، فیبر نوری پلاستیکی	هدایت و افزایش تراکم نور
[60]	۲۰۱۴	ردیابی دومحوره	لنز، فیبر نوری پلاستیکی	هدایت و افزایش تراکم نور
[61]	۲۰۱۵	ردیابی دومحوره	آرایه‌های لنز فرسنل، فیبر نوری پلاستیکی	هدایت و افزایش تراکم نور
[62]	۲۰۱۶	ردیابی دومحوره	آینه‌ی منعکس‌کننده، لوله نوری	هدایت نور
[63]	۲۰۱۱	تجزیه و تحلیل زاویه خطای ردیابی	متمرکزکننده‌ی سهموی مرکب Co-focus	هدایت و افزایش تراکم نور
[18]	۲۰۱۸	ردیابی دومحوره	لنز فرسنل، فیبر نوری پلاستیکی	هدایت و افزایش تراکم نور
[64]	۲۰۱۳	ردیابی دومحوره	متمرکزکننده‌ی بشقابی و بازتاب‌کننده‌ی ثانویه، فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[65]	۲۰۱۸	به همراه ردیابی	ممرکزکننده بشقابی و بازتاب‌کننده ثانویه، فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[26]	۲۰۱۷	ردیابی دومحوره	لنز فرسنل و متمرکزکننده سهموی مرکب، باندهای فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور
[27]	۲۰۱۴	به همراه ردیابی	متمرکزکننده سهموی خطی و یا لنز فرسنل خطی، فیبر نوری	هدایت و افزایش تراکم نور

همان‌طور که شاره شد سامانه‌های روشنایی فعال روزانه برای جمع‌آوری نور خورشید از فناوری ردیابی استفاده می‌کند. پس از متمرکزکردن، نور خورشید از طریق فیبرنوری یا لوله نور به فضای داخل منتقل می‌شود [66]. فناوری که نور از طریق فیبر نوری منتقل می‌شود، سامانه‌ی فیبرنوری نیز نامیده می‌شود. جنس فیبر مورد استفاده در سامانه‌های روشنایی فیبرنوری SiO_2 یا کوارتز[1] و پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA)[2] هستند که مشخصات آن‌ها در جدول ۵ نشان داده‌شده است.

[1] Quartz

[2] Polymethylmethacrylate

جدول ۵. جنس فیبر مورد استفاده در سامانه‌های روشنایی فیبرنوری و مشخصات آن‌ها[18]

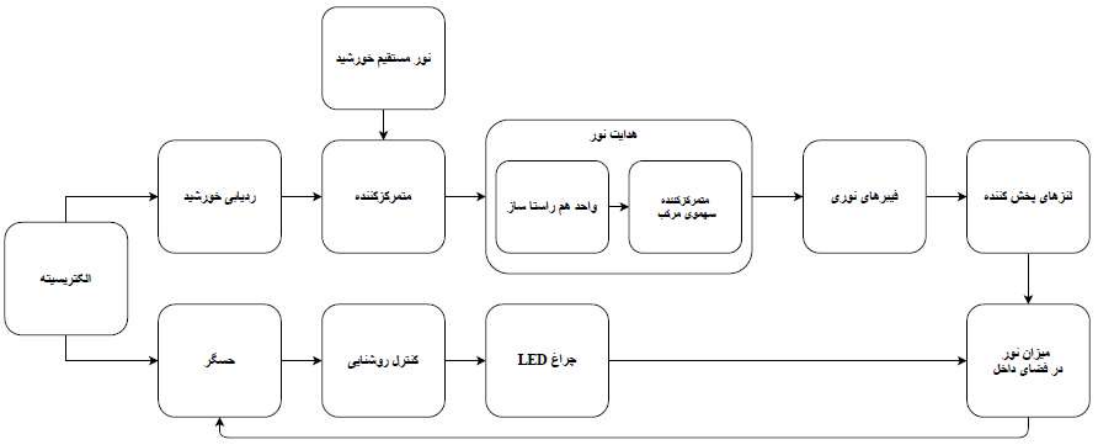
متغیر	فیبر نوری پلاستیکی[1]	فیبر نوری سیلیس[2]
ماده	Poly (methyl Methacrylate)	SiO_2
قطر	۲ میلی‌متر	۰/۲ میلی‌متر
میرایی	۱۰۰ dB/km	۸ dB/km
عدد روزنه (Numerical aperture)	۰/۵	۰/۲۲
هزینه به ازای متر	۱ $/m	۸ $/m
ماکزیمم تحمل دمایی	۸۰ C°	900 C°
جرم مخصوص	۱ g/cm3	۲/۵ g/cm3
انعطاف‌پذیری	بالا	پایین

لنزهای فرسنل از موارد متمرکزکننده‌ی نور رایج نور در سامانه‌های فعال هستند. در بسیاری از مطالعات از لنزهای فرسنل با باندهای فیبرنوری برای آزمایش در محیط‌های مختلف یا شرایط مختلف نوری استفاده شده‌است. راوی و همکاران[3] [26] سامانه‌ی روشنایی خورشیدی بر پایه‌ی لنز فرسنل و فیبر نوری را با استفاده از یک طرح نوری ثانویه با قابلیت جمع‌آوری نور آفتاب توسط لنزهای فرسنل، بدون ایجاد صدمات حرارتی در ورودی فیبر را توسعه دادند. این سامانه می‌تواند ۲۷۰۰ تا ۳۶۰۰ لومن (بر اساس مواد مختلف) با نور محیط خارجی ۱۱۰ کیلو لوکس فراهم کند. نسبت شدت نور بالای لنزهای فرسنل باعث صدمه حرارتی به فیبر نوری می‌شود؛ اما بخاطر دوام و پایداری سامانه، بیشتر سامانه‌های روشنایی خورشیدی از نظر حرارتی محافظت می‌شوند. سونگ و همکاران[4] روی تأثیر حرارتی که اشعه‌ی مادون قرمز بر فیبر نوری PMMA یا فیبر پلاستیکی در دماهای بالای ۷۰ درجه سلسیوس تمرکزکردند؛ زیرا فیبر پلاستیک ظرفیت جذب بالایی برای طیف مادون قرمز دارد. هنگامی‌که نسبت شدت نور بیش از ۲۵۰۰ به بالا باشد، فیبر پلاستیکی به راحتی می‌تواند بیش‌ازحد گرم و ذوب شود. بنابراین، از فیلتر میان‌گذر[5] جهت کاهش میزان صدمات ناشی از اشعه‌ی مادون قرمز برای کنترل دمای کاری و افزایش عمر سامانه استفاده شد. هدف این روش همانند بسیاری از مطالعات که از آینه داغ یا آینه سرد استفاده کردند، حذف یا کاهش اشعه‌ی مادون قرمز و ماوراءبنفش است [67]. در پژوهشی دیگر [59] محافظت از فیبرهای پلاستیکی در شدت بالای تمرکز، برای متمرکزکننده‌های سهموی بررسی شد. در این روش پس از استفاده از فیلترهای UV و IR در مرحله اول، پرتوی فیلتر شده از خلأ عبور می‌کند تا آسیب گرمای ناشی از اشعه مادون قرمز را از بین ببرد. سپس نور یکنواخت توسط لنزهای دوطرف محدب تولید می‌شود و همزمان اثر حرارتی نور متمرکزشده را کاهش می‌دهد. این طرح شامل یک متمرکزکننده سهموی است که از ۳۴۰ آینه با راندمان تابش ۹۴ درصد تشکیل‌شده است. نتایج تجربی نشان داد که یک سامانه با فیلتر سه‌گانه، دارای ضریب نور ۲/۹ درصد است.

متمرکزکننده سهموی دارای نسبت تمرکز خورشیدی بالایی است. مزیت استفاده از متمرکزکننده‌ی کاسگرین این است که از انعکاس‌های هایپربولیک و سهموی استفاده می‌کند و آینه‌های سهموی مقعر، نور را در نقطه تمرکز، متمرکز می‌کنند. نور دریافتی بر روی عنصر نوری ثانویه منعکس و سرانجام بازتاب ثانویه به فیبر انجام می‌شود. اگرچه یک افت در اثر بازتاب به وجود می‌آید، اما این روش طراحی می‌تواند از سطح ورودی نور فیبر محافظت کند و سطح تمرکز نور آفتاب را نیز افزایش دهد تا به یک نسبت تمرکز خورشیدی بالا برسد. هنگامی‌که نسبت شدت بیشتر باشد، سامانه می‌تواند نور بیشتری را به فضای داخل خانه منتقل کند. در پژوهشی چونگ و همکاران[6] [25] از تعدادی

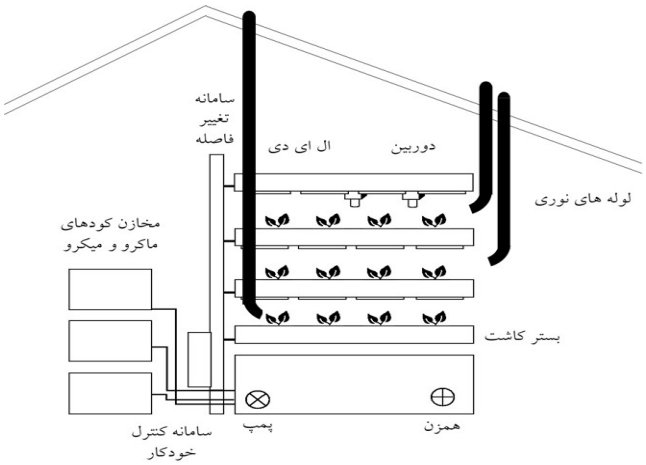
[1] Plastic optical fiber
[2] Silica Fiber
[3] Ravi et al
[4] Song et al
[5] shortpass dichroic mirror
[6] Chong et al

بازتابنده کوچک استفاده کردند تا یک متمرکزکننده سهموی تشکیل دهند که می‌تواند به میانگین شدت خورشیدی ۶۶٫۶ برابر برسد. در این حالت، سطح تمرکز ۰/۲ مترمربع می تواند برای فضای اداری ۷/۸ مترمربع، بالاتر از ۵۰۰ لوکس نور فراهم کند. هرچه نسبت تمرکز بالاتر باشد، مساحت مورد نیاز برای ناحیه تمرکز نور در فضای باز کوچک‌تر است و این یک راه‌حل مناسب برای مکان‌های با محدودیت فضا است. در پژوهشی دیگر [27] از متمرکزکننده‌های CPC برای نورپردازی فیبرنوری با استفاده از ردیابی تک‌محور برای هدایت نور آفتاب به فضای داخلی استفاده کردند. در این پژوهش تأکید شد که استفاده از یک سامانه‌ی بزرگ نسبت به چندین سامانه‌ی کوچک مؤثرتر است. عملکرد کلی و هدف سامانه‌های نورپردازی فعال، غیرفعال و سامانه‌های هیبریدی، مانند هم می‌باشد. هر دو در روز که نور ناپایدار هست به روشنایی کمک می‌کنند که در جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. در پژوهشی [27] پیشنهاد شد که سامانه‌های هیبریدی نه‌تنها به تجهیزات ردیابی خورشیدی احتیاج دارند، بلکه به حسگرها و کنترل‌کننده‌های روشنایی نیز برای دستیابی به بهترین کیفیت نور نیاز دارد درشکل ۴ دیاگرام پیشنهادی سامانه‌های روشنایی خورشیدی هیبریدی نمایش داده شده است. علاوه بر مؤلفه‌های مکانیکی و نوری سامانه‌های روشنایی، به لوازم روشنایی هیبریدی نیز در این سامانه‌ها نیاز است تا نور آفتاب و نور الکتریکی برای روشنایی ترکیب شوند [26]. استفاده بهینه از نور آفتاب و روشنایی الکتریکی روش مناسبی برای تعادل در مصرف برق است، زیرا نور آفتاب برای کاهش مصرف برق در هنگام کاهش روشنایی مناسب است [64].



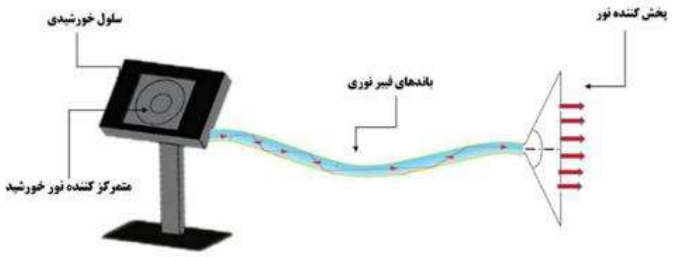
شکل ٤. دیاگرام پیشنهادی سامانه‌های روشنایی خورشیدی هیبریدی [27].

از موارد کاربرد سامانه‌های روشنایی خورشیدی در کشاورزی می‌توان به روشنایی در بخش‌هایی از کشاورزی در شرایط خاص همچون کشت‌های طبقاتی در گلخانه‌ها، کشاورزی شهری که در منازل برای مصارف روزانه، کشت‌هایی در ابعاد کوچک و در محیط‌های بسته انجام می‌شود، اشاره کرد. همچنین از آنجا که عموماً این سامانه‌ها گرمایی ایجاد نمی‌کنند یا گرمای انتقالی بسیار کمی دارند، می‌توان از آن‌ها در بخش‌های آزمایشگاهی که گیاهان نسبت به دما حساس هستند استفاده کرد و طیف کاملی از نور مرئی در اختیار گیاهان قرار داد. شکل ۵ طرح پیشنهادی برای یک سامانه‌ی کنترل خودکار عمودی مجهز به نور تکمیلی برای کاشت هیدروپونیک محصولات در گلخانه می‌باشد که در گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس مطرح شده است [۶۸].



شکل ۵. طرح پیشنهادی برای یک سامانه‌ی کنترل خودکار عمودی مجهز به نور تکمیلی برای کاشت هیدروپونیک کاهو [۶۸].

در همین راستا مطالعه‌ای دیگر در دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، با هدف ایجاد سامانه‌ای برای کاربردهای روشنایی خورشیدی در بخش کشاورزی، در حال انجام است [۶۹] که از آزمایشات و طرح‌های اولیه‌ی این پژوهش نتایج قابل قبولی بدست آمده است. در این سامانه از متمرکزکننده‌ی سهموی که سطح آن به وسیله‌ی استیل آیینه‌ای پوشانده شده است، برای متمرکز کردن نور آفتاب و از باندهای فیبرهای نوری PMMA برای انتقال نور استفاده شده است. موتورهای DC در مختصات کارتزین ردیابی را در دو جهت انجام داده و توانایی تعقیب خورشید را در طول روز برای متمرکزکننده فراهم می‌کنند. برای حل مشکل گرمای ایجاد شده در اثر تمرکز نور آفتاب که سبب آسیب‌دیدگی و ذوب شدن فیبرهای پلاستیکی می‌شود، یک راهکار خلاقانه‌ای پیشنهاد شده است که برای خنک کاری فیبرها از آب استفاده شود. از مزیت‌های استفاده از این روش می‌توان به سادگی استفاده از آن و کاهش هزینه‌ها اشاره کرد. همچنین پیشنهاد شد که از پنل‌های فتوولتائیک برای تغذیه‌ی سامانه استفاده شود، بطوری که بخش ردیابی سامانه با یک ساختار یکپارچه، پنل‌های فتوولتائیک و متمرکزکننده‌ی نور آفتاب را همزمان برای دنبال کردن خورشید هدایت کند. از مزایای آن می‌توان به صرفه‌جویی در مصرف برق و انرژی اشاره کرد. نمای کلی و اولیه‌ی سامانه‌ی روشنایی خورشیدی پیشنهادی در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل٦. نمای کلی و اولیه‌ی از سامانه‌ی روشنایی خورشید پیشنهادی [۶۹].

بحث

در این پژوهش، بررسی سامانه‌های روشنایی خورشیدی در دو بخش صورت گرفت. اول، بررسی پژوهش‌ها در خصوص سامانه‌های نورپردازی منفعل لوله‌ی نوری انجام گرفت. این سامانه‌ها از لوله‌های مستقیم برای انجام آزمایش‌ها در اتاقک‌های آزمایشی استفاده می‌کنند. از مزیت آن‌ها ارزان بودن و استفاده‌ی آسان است و به دلیل بهبود در مواد ساخت گنبد دریافت‌کننده نور و یا لوله‌ی انتقال، عملکرد آن‌ها بهبود می‌یابد. در مناطق استوایی، با شدت زیاد نور آفتاب، نسبت عملکرد به هزینه‌ی سامانه‌ها خوب است، اما استفاده از آن‌ها محدود به سبک‌های مختلف معماری می‌باشد. سامانه‌های لوله‌ی نوری با هیبرید شدن، معمولاً در فضای زیرزمینی یا فضای غیر اداری استفاده می‌شوند و روشنایی که با نور آفتاب مخلوط می‌شود باعث صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. سامانه‌های روشنایی فعال برای مکان‌هایی که نیاز به انتقال نور در مسافت طولانی، مانند مکان‌هایی که ساختمان‌های مرتفع دارند و محل‌های با عمق زیاد می‌باشند، مناسب هستند. تأمین مناسب نور برای مسافت‌های طولانی، توسط سامانه‌های فیبرنوری که قبلیت انعطاف‌پذیری داشته و عملکرد تغییر مسیر خوبی دارند، امکان‌پذیر است. در این سامانه‌ها برای انتقال نور، هزینه و انرژی بیشتری صرف می‌شود و می‌توان گفت که همه‌ی سامانه‌ها برای انواع مختلف مکان‌ها قابل استفاده نیستند. سامانه‌های فیبر نوری قادر هستند نور را در طولانی‌ترین مسافت بین سامانه‌های روشنایی با توجه به محدودیت جنس فیبر، حدود ۷۰ متر منتقل کنند. اگر از ماده‌ای با ضریب افت پایین‌تر مانند فیبر کوارتز استفاده شود، هزینه‌ها بسیار بالاتر خواهد بود. درحال حاضر، از میان مشکلاتی که در سامانه‌های نورپردازی خورشیدی وجود دارند، می‌توان به مواردی مانند هزینه بالا، متأثر بودن سامانه‌ها از شرایط آب و هوایی، مشکلات نصب و عدم متداول بودن بین عموم اشاره کرد. هیچ استانداردی برای طراحی یکنواخت متمرکزکننده‌ها وجود ندارد و هزینه تحقیق آن نیز بسیار بالا می‌باشد. توصیه‌های طراحی سامانه‌ی روشنایی خورشیدی و سناریوهای استفاده از هیبرید در سامانه‌های روشنایی خورشیدی در موارد زیر ذکر شده‌اند:

- ارزیابی موقعیت جغرافیایی محل مورد نظر و میزان نور خورشید به‌منظور تعیین نوع سامانه؛
- به دلیل تابش مستقیم خورشیدی کافی در مناطق استوایی، سامانه‌های لوله نوری مناسب هستند؛
- در عرض‌های جغرافیایی بالا، ساعات نور آفتاب کوتاه است. لذا توصیه می‌شود از متمرکزکنندگی بالا و پیوسته‌تر سامانه‌ی روشنایی فعال استفاده شود؛
- هیبرید برای هر سامانه‌ی روشنایی خورشیدی مناسب است. هدف استفاده‌ی کامل از روشنایی آفتاب نیست، بلکه صرفه‌جویی در مصرف انرژی است؛
- با استفاده از خصوصیات انعطاف‌پذیر باتری‌های فیلم نازک. باتری را می‌توان در سطح متمرکزکننده توزیع کرد که نه‌تنها می‌تواند عملکرد نوری خوبی را ارائه دهد بلکه همزمان برق تولید می‌کند.

نتیجه‌گیری

با هدایت نور آفتاب به فضای داخلی، می‌توان از طیف کامل نور مرئی استفاده کرد. با پیشرفت مؤلفه‌هایی مانند کامپیوتر، موتورها و حسگرها، بسیاری از سامانه‌های روشنایی استاتیک به‌تدریج به سامانه‌های پویا تبدیل شدند. این تغییر باعث افزایش چشم‌گیر راندمان و استمرار و پایداری بیشتر نور می‌شود. با بررسی نتایج حاصل از ارزیابی سامانه‌های مختلف نورپردازی نمونه‌ی اولیه و آزمایشگاهی، می‌توان دریافت که پژوهشگران هنوز در تلاش هستند تا تعادلی بین هزینه و کارایی ایجاد کنند. مشکل هزینه‌ی زیاد ساخت این سامانه‌ها یا تطبیق‌پذیری کم آن‌ها باعث می‌شود که نور حاصل از این سامانه‌ها گران‌تر از روشنایی با برق باشد. البته اکثر سامانه‌های تجاری ارزان‌تر از بسیاری از سامانه‌های

نمونه‌ی آزمایشگاهی هستند. دلیل احتمالی این است که افزایش تولید باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. اگر در امر ساخت سامانه بتوان ارزیابی-های تولید در مقیاس بالا را در نظر گرفت، در برآورد هزینه‌ی اولیه کمک شایانی خواهد کرد. در آینده از سامانه‌های روشنایی خورشیدی بیشتری استفاده خواهد شد و باید سامانه‌هایی طراحی شوند که انرژی کمتری مصرف می‌کنند و دوره بازگشت هزینه‌ی کوتاهی داشته باشند. سامانه‌های روشنایی خورشیدی با توجه به موقعیت‌های جغرافیایی، زمانی و محل استقرار، دارای عملکرد و کاربردهای مختلف می‌باشند. به عنوان مثال در حوزه‌ی کشاورزی برای استفاده از سامانه‌های روشنایی خورشیدی باید معماری و ساختمان گلخانه‌ها مورد توجه قرار گیرد. همچنین در طرح سامانه باید سطوح و شدت روشنایی مورد نیاز گیاهان در بازه‌ی زمانی تعیین شده برای آن‌ها در نظر گرفته شود یا مکانیزمی برای کنترل آن در نظر گرفته شود.

نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

- از مزایای سامانه‌ی خورشیدی هدایت نور لوله‌ای، هزینه‌ی اولیه‌ی کم نسبت به سامانه‌های پیچیده‌تر و کیفیت بالای روشنایی در آن‌ها است. این سامانه‌ها روی سقف نصب می‌شوند و نور آفتاب را تا فاصله‌ی کمتر از ۱۰ متر تأمین می‌کند؛
- فیبر نوری خاصیت انعطاف‌پذیر بودن دارد، لذا سامانه‌های فعال نورپردازی با فیبر نوری برای استفاده در مکان‌هایی با فضای پیچیده مانند گلخانه‌های طبقاتی و در مسافت انتقال ده‌ها متر، مناسب هستند؛
- در ساعات و محیط‌های جغرافیایی مختلف، نیاز به نور و روشنایی در سطوح مختلف می‌باشد، بنابراین سامانه‌هایی که به‌طور ترکیبی از نور خورشیدی و نور مصنوعی استفاده می‌کنند، توسعه‌یافته‌اند که می‌توان از آن‌ها در قسمت‌های مختلف از جمله در بخش کشاورزی و گلخانه‌ها استفاده کرد؛
- انرژی خورشیدی به‌طور دوره‌ای در دسترس هست و تابش آفتاب به‌خوبی پیش‌بینی می‌شود؛ بنابراین می‌توان یک راهبرد روشنایی مؤثر روزانه را برنامه‌ریزی کرد.

منابع

[۶۸] محمدی، و. مینائی، س. (۱۳۹۸). طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه کنترل خودکار عمودی مجهز به نور تکمیلی برای کاشت هیدروپونیک کاهو. طرح پیشنهادی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

[۶۹] کریمی یایشهری، ا. گرجیان، ش. مینائی، س. (۱۳۹۸). طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه‌ی روشنایی ترکیبی خورشیدی بر پایه‌ی فیبر نوری و سلول‌های فتوولتائیک. طرح پیشنهادی در گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

[1] J. Coventry and C. Andraka, “Dish systems for CSP,” *Sol. Energy*, vol. 152, pp. 140–170, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.02.056.

[2] M. G. Nair, K. Ramamurthy, and A. R. Ganesan, “Classification of indoor daylight enhancement systems,” *Light. Res. Technol.*, vol. 46, no. 3, pp. 245–267, 2014.

[3] M. S. Mayhoub, “Innovative daylighting systems’ challenges: A critical study,” *Energy Build.*, vol. 80, pp. 394–405, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.019.

[4] I. L. Wong, “A review of daylighting design and implementation in buildings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 959–968, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.061.

[5] M. S. Alrubaih, M. F. M. Zain, M. A. Alghoul, N. L. N. Ibrahim, M. A. Shameri, and O. Elayeb, “Research and development on aspects of daylighting fundamentals,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 494–505, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.057.

[6] Q. Zeng, T. Dellenbaugh, M. Maldonado, J. Moon, and R. Hornstra, "Vitamin D status of psychiatric inpatients at a community teaching hospital in the Midwest," *Nord. J. Psychiatry*, vol. 70, no. 3, pp. 208–214, Apr. 2016, doi: 10.3109/08039488.2015.1080297.

[7] M. F. Holick, "Vitamin D: importance in the prevention of cancers, type 1 diabetes, heart disease, and osteoporosis," *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 79, no. 3, pp. 362–371, Mar. 2004, doi: 10.1093/ajcn/79.3.362.

[8] M. F. Holick, "Sunlight and vitamin D for bone health and prevention of autoimmune diseases, cancers, and cardiovascular disease," *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 80, no. 6, pp. 1678S-1688S, Dec. 2004, doi: 10.1093/ajcn/80.6.1678S.

[9] G. Courret, J.-L. Scartezzini, D. Francioli, and J.-J. Meyer, "Design and assessment of an anidolic light-duct," *Energy Build.*, vol. 28, no. 1, pp. 79–99, 1998, doi: https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00066-2.

[10] G. H. Timmermans, R. F. Douma, J. Lin, and M. G. Debije, "Dual Thermal-/Electrical-Responsive Luminescent 'Smart'Window," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 4, p. 1421, 2020.

[11] G. Yun, K. C. Yoon, and K. S. Kim, "The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings," *Energy Build.*, vol. 84, pp. 70–85, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.040.

[12] J. Mardaljevic, L. Heschong, and E. Lee, "Daylight metrics and energy savings," *Light. Res. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 261–283, Sep. 2009, doi: 10.1177/1477153509339703.

[13] M. R. Atif, J. A. Love, and P. J. Littlefair, *Daylighting monitoring protocols and procedures for buildings*. Institute for Research in Construction, 1997.

[14] M. Mayhoub, "Guidelines for daylight guidance systems application," in *Proceedings of the 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture+ Urban Design: Opportunities, Limits and Needs—Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA, Lima, Peru*, 2012, pp. 7–9.

[15] L. Sharma, S. F. Ali, and D. Rakshit, "Performance evaluation of a top lighting light-pipe in buildings and estimating energy saving potential," *Energy Build.*, vol. 179, pp. 57–72, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.022.

[16] M. Al Marwaee and D. J. Carter, "A field study of tubular daylight guidance installations," *Light. Res. Technol.*, vol. 38, no. 3, pp. 241–258, Sep. 2006, doi: 10.1191/1365782806lrt170oa.

[17] B. Malet-Damour, S. Guichard, D. Bigot, and H. Boyer, "Study of tubular daylight guide systems in buildings: Experimentation, modelling and validation," *Energy Build.*, vol. 129, pp. 308–321, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.019.

[18] R. C. Allil *et al.*, "Solar tracker development based on a POF bundle and Fresnel lens applied to environment illumination and microalgae cultivation," *Sol. Energy*, vol. 174, pp. 648–659, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.061.

[19] M. G. Nair, A. R. Ganesan, and K. Ramamurthy, "Conceptual design and assessment of a profiled Fresnel lens daylight collector," *Light. Res. Technol.*, vol. 47, no. 5, pp. 533–547, Jun. 2014, doi: 10.1177/1477153514535421.

[20] I. Ullah, H. Lv, A. J.-W. Whang, and Y. Su, "Analysis of a novel design of uniformly illumination for Fresnel lens-based optical fiber daylighting system," *Energy Build.*, vol. 154, pp. 19–29, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.066.

[21] A. Barbón, J. A. Sánchez-Rodríguez, L. Bayón, and C. Bayón-Cueli, "Cost estimation relationships of a small scale linear Fresnel reflector," *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 1273–1284, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.060.

[22] T. T. Pham, N. H. Vu, and S. Shin, "Daylighting System Based on Novel Design of Linear Fresnel lens," *Buildings* , vol. 7, no. 4. 2017, doi: 10.3390/buildings7040092.

[23] N. H. Vu and S. Shin, "A Large Scale Daylighting System Based on a Stepped Thickness Waveguide," *Energies* , vol. 9, no. 2. 2016, doi: 10.3390/en9020071.

[24] C. Sapia, "Daylighting in buildings: Developments of sunlight addressing by optical fiber," *Sol. Energy*, vol. 89, pp. 113–121, 2013.

[25] K.-K. Chong, N. O. Onubogu, T.-K. Yew, C.-W. Wong, and W.-C. Tan, "Design and construction of active daylighting system using two-stage non-imaging solar concentrator," *Appl. Energy*, vol. 207, pp. 45–60, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.188.

[26] R. Gorthala, M. Tidd, and S. Lawless, "Design and development of a faceted secondary concentrator for a fiber-optic hybrid solar lighting system," *Sol. Energy*, vol. 157, pp. 629–640, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.070.

[27] I. Ullah and S. Shin, "Highly concentrated optical fiber-based daylighting systems for multi-floor office buildings," *Energy Build.*, vol. 72, pp. 246–261, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.031.

[28] A. J.-W. Whang *et al.*, "Natural light illumination system," *Appl. Opt.*, vol. 49, no. 35, pp. 6789–6801, 2010, doi: 10.1364/AO.49.006789.

[29] J. T. Kim and G. Kim, "Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 256–269, 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.024.

[30] T. Dogan and P. Stec, "Prototyping a façade-mounted, dynamic, dual-axis daylight redirection system," *Light. Res. Technol.*, vol. 50, no. 4, pp. 583–595, Oct. 2016, doi: 10.1177/1477153516675392.

[31] A. Kontadakis, A. Tsangrassoulis, L. Doulos, and F. Topalis, "An active sunlight redirection system for daylight enhancement beyond the perimeter zone," *Build. Environ.*, vol. 113, pp. 267–279, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.029.

[32] C. F. Reinhart, J. Mardaljevic, and Z. Rogers, "Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design," *LEUKOS*, vol. 3, no. 1, pp. 7–31, Jul. 2006, doi: 10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001.

[33] A. Nabil and J. Mardaljevic, "Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors," *Energy Build.*, vol. 38, no. 7, pp. 905–913, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013.

[34] M. Hébert, S. K. Martin, C. Lee, and C. I. Eastman, "The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans," *J. Pineal Res.*, vol. 33, no. 4, pp. 198–203, Nov. 2002, doi: https://doi.org/10.1034/j.1600-079X.2002.01885.x.

[35] S. Azhar, W. A. Carlton, D. Olsen, and I. Ahmad, "Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis," *Autom. Constr.*, vol. 20, no. 2, pp. 217–224, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.019.

[36] K. M. Al-Obaidi and A. M. A. Rahman, "Toplighting systems for improving indoor environment: a review," *Renew. Energy Sustain. Technol. Build. Environ. Appl.*, pp. 117–136, 2016.

[37] M. S. Mayhoub and D. J. Carter, "Towards hybrid lighting systems: A review," *Light. Res. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 51–71, Jul. 2009, doi: 10.1177/1477153509103724.

[38] M. Mayhoub, "Cleaning innovative daylighting systems: Review and suggested methods," *Light. Res. Technol.*, vol. 49, no. 8, pp. 1015–1033, 2017.

[39] A. J.-W. Whang, T.-H. Yang, Z.-H. Deng, Y.-Y. Chen, W.-C. Tseng, and C.-H. Chou, "A review of daylighting system: for prototype systems performance and development," *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2863, 2019.

[40] A. Ikuzwe and A. B. Sebitosi, "A novel design of a daylighting system for a classroom in rural South Africa," *Sol. Energy*, vol. 114, pp. 349–355, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.047.

[41] J.-L. Scartezzini and G. Courret, "Anidolic daylighting systems," *Sol. Energy*, vol. 73, no. 2, pp. 123–135, 2002, doi: https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00040-3.

[42] L. Whitehead, A. Upward, P. Friedel, G. Cox, and M. Mossman, "Using core sunlighting to improve illumination quality and increase energy efficiency of commercial buildings," in *Energy Sustainability*, 2010, vol. 43956, pp. 309–316.

[43] D. Carter, "LRT Digest 2 Tubular daylight guidance systems," *Light. Res. Technol.*, vol. 46, no. 4, pp. 369–387, 2014.

[44] K. Vasilakopoulou, D. Kolokotsa, M. Santamouris, I. Kousis, H. Asproulias, and I. Giannarakis, "Analysis of the experimental performance of light pipes," *Energy Build.*, vol. 151, pp. 242–249, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.061.

[45] J. Mohelnikova, "Tubular light guide evaluation," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 10, pp. 2193–2200, 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.015.

[46] G. Y. Yun, H. Y. Shin, and J. T. Kim, "Monitoring and Evaluation of a Light-pipe System used in Korea," *Indoor Built Environ.*, vol. 19, no. 1, pp. 129–136, Feb. 2010, doi: 10.1177/1420326X09358007.

[47] E. S. P. B. V, "Signh, D., and S. K. Sharma. 'Performance ratio, area economy and economic return for an integrated solar energy/multi-stage flash desalination plant.' Desalination 73 (1989): 191-195.," vol. 73, pp. 191–195, 1989, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

[48] X. Yu and Y. Su, "Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation–A literature review," *Renew. Sustain. Energy*

Rev., vol. 52, pp. 494–503, 2015.

[49] S. Ji, G. Cao, J. Zhang, F. Yu, D. Li, and J. Yu, "Lighting design of underground parking with tubular daylighting devices and LEDs," *Optik (Stuttg).*, vol. 127, no. 3, pp. 1213–1216, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.10.189.

[50] D. J. Carter, "The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems," *Light. Res. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 39–51, Mar. 2002, doi: 10.1191/1365782802li029oa.

[51] M. Roshan and A. S. Barau, "Assessing Anidolic Daylighting System for efficient daylight in open plan office in the tropics," *J. Build. Eng.*, vol. 8, pp. 58–69, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.07.002.

[52] A. Z. Hafez, A. M. Yousef, and N. M. Harag, "Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types–A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pp. 754–782, 2018.

[53] Y. T. Chen *et al.*, "Comparison of two sun tracking methods in the application of a heliostat field," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 126, no. 1, pp. 638–644, 2004.

[54] J. Song, G. Luo, L. Li, K. Tong, Y. Yang, and J. Zhao, "Application of heliostat in interior sunlight illumination for large buildings," *Renew. Energy*, vol. 121, pp. 19–27, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.011.

[55] N.-H. Vu and S. Shin, "Cost-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators," *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 145–152, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.064.

[56] D. Lingfors and T. Volotinen, "Illumination performance and energy saving of a solar fiber optic lighting system," *Opt. Express*, vol. 21, no. S4, pp. A642–A655, 2013, doi: 10.1364/OE.21.00A642.

[57] X. Li, Y. Wei, J. Zhang, and P. Jin, "Design and analysis of an active daylight harvesting system for building," *Renew. Energy*, vol. 139, pp. 670–678, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.097.

[58] L. li *et al.*, "An optical fiber daylighting system with large Fresnel lens," *Energy Procedia*, vol. 152, pp. 342–347, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.146.

[59] L. Sedki and M. Maaroufi, "Design of parabolic solar daylighting systems based on fiber optic wires: A new heat filtering device," *Energy Build.*, vol. 152, pp. 434–441, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.023.

[60] J. Song, Y. Zhu, Z. Jin, and Y. Yang, "Daylighting system via fibers based on two-stage sun-tracking model," *Sol. Energy*, vol. 108, pp. 331–339, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.07.021.

[61] J. Song, Z. Jin, Y. Zhu, Z. Zhou, and Y. Yang, "Development of a fiber daylighting system based on the parallel mechanism and direct focus detection," *Sol. Energy*, vol. 115, pp. 484–493, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.022.

[62] A. Peña-García, L. M. Gil-Martín, and E. Hernández-Montes, "Use of sunlight in road tunnels: An approach to the improvement of light-pipes' efficacy through heliostats," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 60, pp. 135–140, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.08.008.

[63] X. Xue, H. Zheng, Y. Su, and H. Kang, "Study of a novel sunlight concentrating and optical fibre guiding system," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 7, pp. 1364–1370, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.020.

[64] H. J. Han, S. B. Riffat, S. H. Lim, and S. J. Oh, "Fiber optic solar lighting: Functional competitiveness and potential," *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 86–101, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.010.

[65] D. Song *et al.*, "Evaluation of a large dish-type concentrator solar lighting system for underground car park," *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 6, pp. 2234–2245, May 2018, doi: https://doi.org/10.1002/er.4017.

[66] B.-J. Chen *et al.*, "Innovative light collimator with afocal lens and total internal reflection lens for daylighting system," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 28, pp. E165–E170, 2015, doi: 10.1364/AO.54.00E165.

[67] J. Song, Y. Zhu, K. Tong, Y. Yang, and M. A. Reyes-Belmonte, "A note on the optic characteristics of daylighting system via PMMA fibers," *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 32–34, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.071.

A Review of the Development of Solar Lighting Systems

Ehsan Karimi[1], Shiva Gorjian[2*], Saeid Minaei[3]

1. Student, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.
3. Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.

Abstract

With the development of solar lighting systems, more light can be provided for the required illuminance in different sectors. In the present study, some lighting systems have been reviewed. Different solar lighting systems such as active, inactive, hybrid, and non-hybrid were studied in this regard. The high cost and utilization of solar lighting systems in different situations are the biggest challenges in developing them. However, active technologies equipped with solar tracking systems are primary in usage. Acquaintance with the benefits of the different laboratory-scale lighting systems and commercialized lighting systems will be helpful. Moreover, taking advantage of the several methods introduced in lab-scale solar lighting systems can help develop solar lighting systems and designs. It is worth mentioning that by using the results of the researches discussed in this article, a study in the same field is underway that is mentioned in the text of this article.

Key words: Solar lighting systems, Tubular Daylight Systems, Optical fiber, Prototype Systems

*Corresponding author
E-mail: Gorjian@modares.ac.ir