

لوله‌های نوری راهکاری برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی ساختمان‌ها

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۷

کد مقاله: ۱۴۹۶۰

فرناز صیامیان^{۱*}، فاطمه مظفری قادیکلانی^۲

چکیده

نور روز از اساسی‌ترین نیازهای جسمی و روانی انسان به شمار می‌رود. این عامل ضمن حفظ سلامتی شرایط مطلوب‌تری را برای افراد فراهم می‌سازد و می‌تواند باعث ایجاد آسایش و افزایش بازدهی شود. باتوجه‌به پتانسیل بسیار زیاد ایران در زمینه تابش نور خورشید متأسفانه تنها ۰٫۲ درصد از این پتانسیل استفاده شده است بنابراین ضروری است که با معرفی تکنولوژی‌های جدید در این زمینه و تحقیقات بیشتر از این پتانسیل بسیار بیشتر استفاده شود. در این مقاله به معرفی لوله‌های نوری به‌عنوان راهکاری برای استفاده از انرژی رایگان خورشید و در نتیجه صرفه‌جویی در مصرف انرژی پرداخته شده است. همچنین با مرور منابع مختلف پیشرفت‌ها و نوآوری‌های این لوله‌ها نشان داده شده است. ابتدا لوله نوری تعریف شد سپس در مورد ساختار لوله‌ها و انواع سیستم‌های انتقال نور، انواع لوله‌های نوری و ویژگی‌های آن‌ها صحبت شده است. در انتها هم بین لوله‌های نوری و پنجره‌های نورگیر سقفی مقایسه‌ای انجام شد. لوله‌های نوری علاوه بر کاهش مصرف انرژی، به سلامت روحی و جسمی استفاده‌کنندگان نیز کمک کرده است. به دلیل مزایای زیاد این لوله‌ها در بهبود مصرف انرژی در ساختمان‌ها، این لوله‌ها در آینده جایگزین مناسبی نسبت به تأمین روشنایی مصنوعی خواهند بود.

واژگان کلیدی: لوله نوری، نور طبیعی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، انرژی خورشیدی، انرژی‌های تجدیدپذیر.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، siamianfarnaz@gmail.com

۲- استادیار گروه معماری دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

۱- مقدمه

بحران انرژی در سال‌های اخیر، کشورهای جهان را بر آن داشته که با مسائل مرتبط با انرژی، برخوردی متفاوت کنند که در این بین، جایگزینی انرژی‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر و برای مثال انرژی خورشیدی به‌منظور کاهش و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کنترل عرضه و تقاضای انرژی و کاهش انتشار گازهای آلاینده با استقبال فراوانی روبرو گردیده است (شیروی و همکاران، ۱۳۹۵). مسیرهای فعلی معماری به سمت ساختمان‌های سبز دربردارنده طراحی پایدار (صرفه‌جویی در منابع، بهره‌وری انرژی، طراحی غیرفعال، انرژی‌های تجدیدپذیر و غیره) و محیط‌های سالم برای افراد (کیفیت هوا، مواد غیرسمی و سلامت ساکنین) می‌باشد؛ بنابراین، یکی از اصول معماری سبز افزایش استفاده از نور طبیعی برای روشنایی، برای کاهش وابستگی به برق برای روشنایی، در نتیجه کاهش مصرف کلی انرژی ساختمان می‌باشد (شارما^۱، ۲۰۱۸). امروزه در حدود یک‌سوم از مصرف انرژی الکتریکی مربوط به بخش تجاری و خانگی می‌باشد که سیستم‌های تأمین روشنایی از عمده مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در این بخش‌ها می‌باشند. سیستم‌های روشنایی الکتریکی علاوه بر مصرف انرژی، باعث تولید گرما در ساختمان می‌شوند که همین امر موجب کاهش بازده و افزایش مصرف در سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان می‌شود. از این رو صنعت روشنایی نیز در پی کاهش میزان مصرف انرژی و به حداقل رساندن میزان تخریب در محیط‌زیست، به استفاده بیشتر از نور خورشید به‌عنوان یک منبع انرژی ارزان و در دسترس روی آورده است. سیستم‌های گوناگونی جهت انتقال نور طبیعی به داخل ساختمان‌ها و فضاهای موردنظر وجود داشته که تعداد زیادی از این سیستم‌ها به دلیل انتقال مستقیم نور خورشید سبب گرم‌شدن محیط نیز می‌شوند. به‌عنوان مثال استفاده از پنجره‌های بزرگ‌تر، باعث بیشتر شدن روشنایی محیط می‌شود. اما در عین حال این امر باعث گرم‌شدن فضای داخلی در تابستان و همچنین اتلاف انرژی در زمستان می‌شود. از این رو، برای رفع این مشکل، فناوری‌های جدید که روشنایی بیشتری نسبت به روش‌های معمول (همانند استفاده از پنجره به‌تنهایی) دارند، مطرح شده است. همچنین این فناوری‌ها در قسمت‌هایی از ساختمان که به دلیل موقعیتشان دسترسی به نور طبیعی ندارند نیز قابل استفاده بوده و باعث کاهش مصرف برق شده و محیطی سالم‌تر را برای افراد ساختمان فراهم می‌کنند (توکلی، ۱۳۹۴).

کشور ایران در بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی قرار گرفته است و در منطقه‌ای واقع شده که به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در بین نقاط جهان در بالاترین رده‌ها قرار دارد. میزان تابش خورشیدی در ایران بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال تخمین زده شده است که البته بالاتر از میزان متوسط جهانی است. ایران کشوری آفتابی است و از نظر مقدار دریافت تابش نور خورشید در شمار بهترین کشورها قرار دارد که حدود ۳۰۰ روز آفتابی دارد و پتانسیل بالایی جهت دریافت انرژی خورشیدی را دارد (شیروی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱). در ایران در بخش خانگی ۳۰ درصد از میزان برق مصرفی در زمینه روشنایی است در بخش اداری ۲۵ درصد از انرژی صرف روشنایی می‌شود و در بخش صنعتی این نرخ به ۱۹ درصد می‌رسد.

۲- روش انجام کار

شیوه تحقیق به‌صورت توصیفی و روش جمع‌آوری اطلاعات کتابخانه‌ای می‌باشد. برای جستجوی مقالات مرتبط با موضوع در پایگاه‌های Elsevier, Sage, Science direct, پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، پایگاه مرجع دانش (CIVILICA)، پایگاه مرجع تخصصی نور، شبکه پژوهشگران ایرانی و نشریه انرژی ایران و سایت‌های سولاتیوب^۲ و ولوکس^۳ که تولیدکنندگان این قطعات هستند، جستجو انجام داده شد. در جستجو در پایگاه‌ها از کلمات کلیدی لوله نوری، تونل نوری خورشیدی، لوله خورشیدی، Light Pipe، Solar light tube و Natural light استفاده شد. این مقاله از مطالعه مقالات و جمع‌بندی و دسته‌بندی نتایج و مطالب آن‌ها به‌دست آمده است.

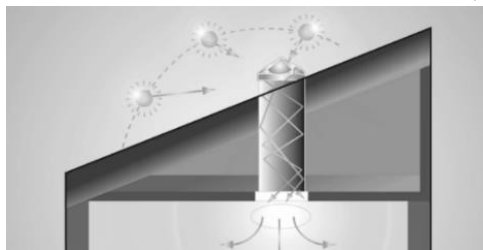
۳- لوله نوری

لوله‌های نوری یا میله‌های نوری ساختارهای فیزیکی به کار برده شده برای انتقال یا توزیع روشنایی طبیعی یا مصنوعی برای اهداف نورافشانی هستند و نمونه‌هایی از موج‌برهای نوری هستند و همچنین آن‌ها اغلب وسیله‌های روشن‌کننده لوله‌ای، میله‌های آفتاب، بردهای آفتاب یا میله‌های روشنی نیز نامیده می‌شوند. به‌طور کلی، یک میله نوری یا لوله نوری برای انتقال نور به مکان دیگری و به‌حداقل رساندن اتلاف نور استفاده می‌شود (دیت^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). این ایده در سال ۱۹۸۶ توسط Solatube International Australia کشف شد و به ثبت رسید. این سیستم برای استفاده گسترده مسکونی و تجاری به بازار عرضه شده

1 Sharma
2 Solatube
3 Velux
4 Date

است. دیگر محصول‌های روشن‌کننده در بازار تحت نام‌های مختلف مانند: «لوله خورشیدی»، «میله نوری»، «لوله نوری»، «پنجره سقفی لوله‌ای» و «تونل خورشیدی» وجود دارند (مالت دیمورا^۱ و همکاران، ۲۰۲۰).

لوله نوری یکی از کلیدی‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است که در علم نور روز و فناوری نور روز مورد استفاده قرار می‌گیرد. لوله نوری یک اختراع انقلابی برای بهره‌وری و پایداری انرژی است. یک وسیله روشنایی روز بسیار مفید است که به نور طبیعی اجازه می‌دهد وارد فضای داخلی محیط شود و بنابراین، نیاز به نور مصنوعی را جایگزین می‌کند که در نهایت باعث کاهش انتشار CO₂ در محیط می‌شود. سیستم‌های هدایت‌کننده نور، نور مستقیم و پراکنده خورشید را به فضای داخلی اتاق می‌فرستند بدون اینکه اثرات ثانویه مانند چشم زدگی^۲ و گرم‌شدن بیش از حد وجود داشته باشد (هانسن^۳، ۲۰۰۶). لوله‌های نوری یک راه بسیار ساده برای انتقال نور طبیعی روز به داخل ساختمان می‌باشد. نور خورشید از یک گنبد پلاستیکی شفاف عبور می‌کند، سپس توسط لوله‌های نوری که دارای سطح صاف و صیقلی هستند هدایت می‌شود (شکل ۱). سطح صیقلی باعث انعکاس نور طبیعی و رایگان به دست آمده از خورشید می‌شود. در داخل اتاق نور از طریق یک وسیله نیمه شفاف به صورت یکنواخت پخش می‌شود. لوله‌های نور برای انتقال نور روز به بخش‌هایی از ساختمان که کم‌نور هستند بسیار مؤثر می‌باشند. آن‌ها می‌توانند با نور مصنوعی جایگزین شده و مصرف سالیانه انرژی یک ساختمان را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند. در بسیاری از موارد لوله‌های نور می‌توانند تمام روشنایی یک فضای داخلی را فراهم کنند. نور روز کیفیت بهتری از نور تولید شده توسط انرژی الکتریکی دارد و برای دریافت‌کنندگان سودمندتر است و همچنین انرژی مورد استفاده در لوله نور رایگان است. این سیستم روشنایی فاقد الکتریسیته و تشعشعات فرابنفش و فرسوخ و تمام مؤلفه‌های مخرب و الکترومغناطیسی و یونیزه کننده می‌باشد و ایمنی صددرصد در رابطه با عوامل خطرآفرین مانند انفجار و حریق و برق‌گرفتگی و ... فراهم می‌کند. لوله نوری یک فناوری پایدار است که می‌تواند نحوه طراحی ساختمان‌ها را در آینده تغییر دهد. ممکن است نیازی به داشتن شیشه‌های وسیع برای ورود بیشتر نور روز به هسته ساختمان‌ها و مقابله با اثرات افزایش بارهای خنک‌کننده نباشد. چندین نوع ساختمان (به‌عنوان مثال ادارات، مدارس، خانه‌های سالمندان، بیمارستان‌ها) می‌توانند از این فناوری که از انرژی مستقیم خورشید بدون هیچ هزینه عملیاتی با میزان روشنایی بالای نور طبیعی استفاده کنند (بلتران^۴، ۲۰۱۴).



شکل ۱- لوله نوری

۴- ساختار لوله نوری

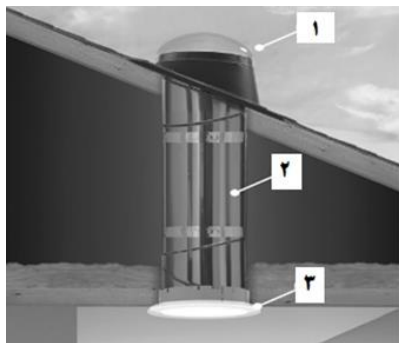
لوله‌های نوری خورشیدی دارای دو نوع فعال^۵ و غیرفعال^۶ می‌باشند. نوع فعال می‌تواند از طریق یک کندانسور نور خورشید را جمع‌آوری کند. این نوع از لوله‌های نوری خورشیدی به دلیل قیمت بالای کندانسور به ندرت در ساختمان‌ها استفاده می‌شود. در زمینه روشنایی بیشتر از نوع غیرفعال استفاده می‌شود که در آن جمع‌کننده نور خارجی با یک لوله فیکس شده است و نور به صورت مثلی در لوله حرکت کرده و بر روی سطح پخش می‌شود (اسحاقی و ابراهیمی‌نژاد، ۱۳۹۱). اجزای اصلی این لوله‌ها شامل قسمت‌های زیر است:

۱. پنل ورودی نور به داخل لوله (جمع‌کننده نور خورشید) که بر روی پشت‌بام قرار می‌گیرد و نور از طریق این ورودی به داخل لوله وارد می‌شود. پوشش قسمت ورودی نور از جنس شیشه است که می‌تواند شکل مسطح یا گنبدی شکل داشته باشد.
۲. لوله‌های انتقال‌دهنده نور به طبقه‌های زیرین،
۳. پخش‌کننده نور که به شکل یک دیفیوزر طراحی می‌شود تا نور را قبل از ورود به ساختمان تاحدامکان پخش کند (توکلی، ۱۳۹۴) (شکل ۲).

1 Malet-Damour
2 Glare
3 Hansen
4 Beltran
5 Active
6 Passive

۴-۱- انواع کلکتورها

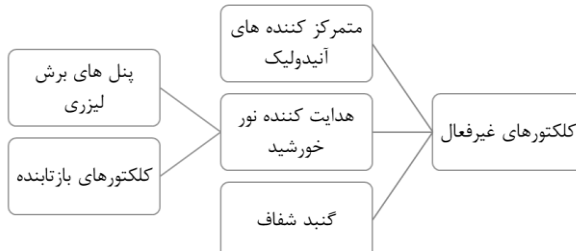
کلکتورها همان جمع‌کننده نور خورشید هستند که در بالاترین قسمت لوله نوری قرار می‌گیرند و به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند: الف) کلکتورهای غیرفعال^۱: کلکتورهایی هستند که هیچ قسمت متحرکی ندارند و دارای یک‌جهت ثابت هستند (موسوی ترشیزی و ابراهیمی، ۱۳۹۱) ب) کلکتورهای فعال^۲: کلکتورهایی هستند که از یک سیستم فعال برای دنبال کردن مسیر خورشید استفاده می‌کنند (موسوی ترشیزی و ابراهیمی، ۱۳۹۱)



شکل ۲- ساختار لوله نوری



نمودار ۲- انواع کلکتورهای فعال



نمودار ۱- انواع کلکتورهای غیرفعال

قسمت کلکتور طوری طراحی شده است که اشعه ماوراء بنفش^۳ خورشید را حذف می‌کند و گرمای ناشی از تابش خورشید را به داخل ساختمان انتقال نمی‌دهد همچنین به دلیل کروی بودن شکل کلکتور مانع از نفوذ برف، گردوغبار و باران به داخل لوله می‌گردد. کارایی لوله‌های نوری به موقعیت مکانی، اقلیم و آب‌وهوا بستگی دارد.

۵- سیستم های انتقال نور^۴

بیشترین کارایی انتقال نور زمانی است که لوله کوتاه و مستقیم باشد. در لوله‌های طویل‌تر، زاویه‌دار یا انعطاف‌پذیر، بخشی از شدت نور از دست می‌رود (هارتونگی^۵، ۲۰۰۸). به‌منظور به‌حداقل رساندن اتلاف‌ها، بازتاب زیاد از پوشش لوله ضروری است؛ تولیدکنندگان بازتاب‌های مواد خود را در محدوده قابل مشاهده تا تقریباً ۹۹٫۵ درصد ادعا می‌کنند. در پایان یک منتشرکننده نور را در اتاق یکسان پخش می‌کند. کارایی انتقال نور در لوله‌های نوری به‌شدت به زاویه ورود نور خورشید به لوله نور بستگی دارد.



نمودار ۳- سیستم‌های انتقال نور

برای بهینه‌سازی بیشتر استفاده از نور خورشید، آینه‌ای روی محور دوار به نام هلیوستات^۶ می‌تواند نصب شود که مسیر حرکت خورشید را ردیابی می‌کند، بنابراین نور خورشید را در هر زمان از روز تا آنجا که محدودیت‌های اطراف اجازه می‌دهد به لوله نور هدایت می‌کند (رضازاده و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین می‌توان هلیوستات را تنظیم کرد تا در شب نور ماه را بگیرد. در نمودار ۳ سیستم‌های مختلف انتقال نور بیان شده است:

- 1 Passive collectors
- 2 Active collectors
- 3 UV
- 4 Light transport systems
- 5 Hartung
- 6 Heliostat

۶- انواع لوله های نوری خورشیدی

لوله های نوری خورشیدی برای انتقال نور به دو دسته لوله های منشوری توخالی و لوله های نوری آینه ای تقسیم می شوند.

۶-۱- لوله های منشوری توخالی^۱

لوله های منشوری توخالی دارای دیواره های شفاف اکریلیک هستند که به وسیله بازتاب های داخلی نور را انتقال می دهند. معمولاً این لوله ها با یک لایه نازک شفاف لاستیکی ساخته می شوند که بازده سیستم را افزایش می دهد. زاویه نور ورودی به لوله برای هدایت از میان آن باید در گستره خاصی باشد. برای این کار یک دستگاه جمع کننده پیچیده مورد نیاز است (موسوی ترشیزی و ابراهیمی، ۱۳۹۱) (شکل ۳). از لوله نوری منشوری می توان برای انتقال نور به مرکز ساختمان و توزیع کارآمد نور در طول سطح مسیر استفاده کرد. در این لوله ها نور تقریباً از فاصله سی متری قابل انتقال است. لوله منشوری توخالی می تواند همراه با نور مصنوعی باشد. از این لوله ها می توان برای روشنایی داخلی یکتواخت، روشنایی فضاهای بزرگ یا خیابان ها، روشنایی تونل ها و پل ها، نورپردازی متروها، راهنماهای روشنایی جاده و ... استفاده کرد (شکل ۴). زمانی که نور در بهترین زاویه وارد لوله شود، لوله تا ۹۸٪ می تواند نور را بازتاب کند. لوله های منشوری توخالی هم انتقال دهنده نور هستند و هم در مسیر نور را بازتاب می کنند و باعث روشنایی می شوند. این لوله ها می توانند سطح مقطع دایره ای، مربعی و مستطیلی داشته باشند. بازدهی این لوله ها به طور میانگین حدود ۳۰٪ است. از مشکلات این لوله ها می توان از هزینه بالا، ایجاد چشم زدگی به دلیل نور زیاد و سیستم کلکتور پیچیده برای دستیابی به بهترین زاویه تابش نام برد.



شکل ۴- لوله منشوری توخالی نصب شده در برلین آلمان برای ورود نور خورشید به مترو



شکل ۳- لوله منشوری توخالی

۶-۲- لوله های نوری آینه ای^۲

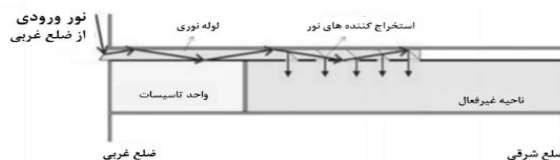
لوله های نوری آینه ای لوله هایی هستند که از یک آینه یا یک پانل برش لیزری در آن برای متمرکز کردن نور خورشید استفاده می شود. این لوله ها به دو صورت افقی و عمودی تقسیم می شوند:

۶-۲-۱- لوله نوری افقی

لوله نوری افقی مجرای افقی است که سطح داخلی آن بازتابنده می باشد. در لوله نوری با شیشه ساده در ورودی نور با هر زاویه ای که به سطح شیشه برخورد کند وارد لوله می شود و به خاطر بازتاب های متعدد مقدار زیادی از آن تلف شده و شدت آن کاهش می یابد (شکل ۵). در لوله نوری با پانل برش لیزری^۳، پانل برش لیزری (شکل ۶)، نور را در امتداد لوله هدایت می کند. با این روش تعداد بازتاب های نور کمتر شده و شدت آن کمتر کاهش می یابد (موسوی ترشیزی و ابراهیمی، ۱۳۹۱).



شکل ۶- نمونه ای از پانل برش لیزری (کالو^۴، ۲۰۰۳)



شکل ۵- برش عرضی لوله نوری افقی

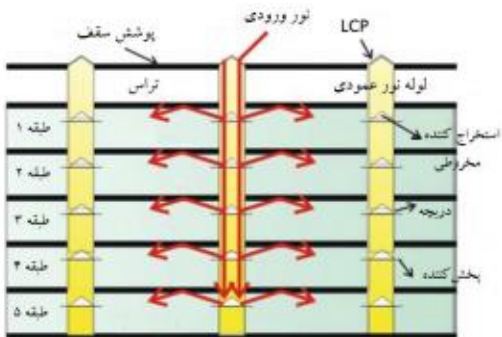
- 1 Hollow prismatic pipes
- 2 Mirrored light pipes
- 3 Laser cutting panel (LCP)
- 4 Callow

مشکل اصلی لوله‌های نور افقی این است که آنها معمولاً باید به اندازه کافی کوچک باشند تا با سایر زیرساخت‌های ساختمان (مجاری مکانیکی، نور، ساختار و غیره) در پلنوم^۱ سقف قرار بگیرند. این عرض فضای پلنوم (عرض تا ۵۰ سانتیمتر) قطر لوله‌ها را محدود می‌کند و می‌تواند انتقال نور به فضاهای عمیق را دشوار کند. در نتیجه، در طراحی دستگاه‌های کلکتور مهم است تا اطمینان حاصل شود که لوله‌های نور افقی محدود به پلنوم یک راه‌حل مناسب برای روشنایی روز هستند.

۶-۲-۲- لوله نوری عمودی

طراحی لوله‌های نوری عمودی شامل یک شکل هرمی LCP به عنوان جمع‌کننده می‌باشد، تا هدایت نور خورشید تأیید شده با زاویه کم را در جهت محوری لوله نور بهبود بخشد. یک دریچه در هر طبقه برای استخراج نور وجود دارد که بخشی از نور عبوری از آن پخش می‌شود (موسوی ترشیزی و ابراهیمی، ۱۳۹۱).

توسعه لوله‌های نوری کارآمد برای انتقال نور خورشید در فواصل چندین متری امکان ایجاد نور طبیعی روز با کیفیت بالا به فضای داخلی، یا هسته اصلی ساختمان‌های چندطبقه را فراهم می‌کند (شکل ۷). اگر این سیستم‌های لوله‌ای روشنایی روز از ابتدا در ساختمان‌ها طراحی شوند، می‌توان هزینه‌ها را کنترل کرد و مشکلات عادی را می‌توان به حداقل رساند. برای مؤثر بودن چنین سیستم‌هایی، روشنایی مناطق نسبتاً بزرگ، دو نیاز اساسی را می‌توان شناسایی کرد:



شکل ۷- لوله نوری عمودی

۱. برای قراردادن مقادیر کافی شار خورشیدی در لوله نور، برای توزیع بعدی در مناطق مفید ساختمان، به یک یا چند متمرکزکننده خورشیدی نیاز است. برای تمرکز کافی، این المان نوری میدان دید نسبتاً محدودی خواهد داشت و بنابراین نیاز به ردیابی خورشید در طول روز دارد. این سیستم ردیابی تمرکز و جمع‌آوری خورشیدی اغلب بر روی سقف (یا بر روی یک دیوار بیرونی) ساختمان قرار داده شده است.

۲. به دلیل تمرکز شار، سیستم لوله‌کشی باید بتواند سطح بالای شار خورشیدی را که توسط متمرکزکننده گرفته شده و متمرکز شده است، بدون آسیب رسیدن به لوله‌های نوری انتقال دهد.

روش‌های استخراج نور در ساختمان‌های بلند و در طبقات معمولاً به دو صورت است:

(الف) ترکیب سیستم‌های استخراج و پخش نور که شامل یک استخراج‌کننده با شکل مخروطی می‌باشد که با شیب مناسب در داخل لوله نور و روبروی هر دریچه خروجی قرار گرفته است؛ تا بخشی از نور را به فضای داخلی هدایت کند. یک تاقچه پخش‌کننده مجاور هر دریچه قرار گرفته است تا نور روبه‌بالا پخش شده و از نگاه مستقیم ساکنین طبقه به دریچه خروجی جلوگیری کند.

(ب) در هر طبقه در مسیر نور عبوری از لوله یک جمع‌کننده از نوع فلورسنت که به شکل حلقه می‌باشد قرار می‌گیرد. مولکول‌های رنگی ماده فلورسنت بخشی از نور عبوری که به صفحه برخورد می‌کند را جذب می‌کنند. تشعشع فلورسنت گسیل شده^۲ و از طریق بازتاب‌های داخلی ماده به لبه صفحه رسیده و سپس وارد فضای طبقات می‌شوند (موسوی ترشیزی و ابراهیمی، ۱۳۹۱).



شکل ۸- لوله نوری صلب

به دلیل اینکه این سیستم‌ها برای رفع نیاز در کاربردهای بسیار متنوع و گسترده‌ای طراحی و ساخته می‌شوند، در مرحله انتخاب نوع مناسب برای کاربرد خاص ما، معمولاً با چند گزینه روبه‌رو می‌شویم. اولین ویژگی که در انتخاب یک لوله نوری باید مشخص شود، این است که باید از لوله قابل انعطاف^۳ استفاده شود یا لوله صلب و غیرقابل انعطاف^۴. این انتخاب بستگی به این دارد که خواهیم نور را به کجا هدایت کنیم و در این مسیر باید از چه موانه عبور کرد. لوله‌های نوری غیرقابل انعطاف از یک لوله صاف و مستقیم مانند شکل ۸ تشکیل شده است که نور را به جایی که مدنظر است هدایت می‌کند. این لوله‌ها را

- 1 Plenum
- 2 Emitted fluorescent
- 3 Flexible sun tunnel
- 4 Rigid sun tunnel



شکل ۹- لوله نوری قابل انعطاف

نمی‌توان خم کرد یا به آن زاویه داد، اما بیشترین میزان انتقال نور را، به دلیل مستقیم بودن مسیر حرکت نور، دارا می‌باشند. لوله‌های غیرقابل انعطاف معمول‌ترین انتخاب برای کاربردهایی است که در آن لوله در فضای خالی بین پشت‌بام و سقف اتاق‌ها قرار گیرد. در لوله‌های نوری قابل انعطاف، از لوله‌های خم شده یا دارای زاویه استفاده می‌شود که در حین انتقال نور به داخل اتاق از میزان آن می‌کاهد. باین‌حال، به دلیل نحوه بازتاب نور از سطح داخلی منعکس‌کننده داخل لوله، می‌توان موانعی را که از استفاده لوله‌های صلب جلوگیری می‌کنند، دور زد. برای مثال اگر اتاق زیر شیروانی ما حاوی سیستم‌های تهویه مطبوع و یا لوله‌کشی و ... باشد، می‌توان با استفاده از لوله‌های قابل انعطاف از کنار این موانع عبور کرد (شکل ۹).

لوله‌های منعطف، مناسب‌ترین گزینه برای استفاده در فاصله‌های کم است که به ما این اجازه را می‌دهد تا بهترین مکان را بر روی پشت‌بام برای قرارگیری پنل دستگاه انتخاب کنیم و لوله را از آنجا دقیقاً به مکانی که روی سقف در نظر داریم هدایت کنیم، حتی اگر آن مکان به صورت مستقیم در زیر موقعیت پنل نباشد.

مقدار نوری که یک لوله نوری می‌تواند فراهم کند به چند فاکتور وابسته است. یکی از این فاکتورها این است که آیا پشت‌بام ساختمان به سمت جنوب است یا نه، در صورتی که پشت‌بام به سمت جنوب باشد، دستگاه قابلیت فراهم ساختن بیشترین میزان ممکن نور را خواهد داشت. در غیر این صورت نیز مشکلی به وجود نخواهد آمد، زیرا لوله‌های نوری دارای قابلیت انعکاس نور خیلی خوبی هستند و می‌توانند میزان قابل قبولی از نور را در جهت‌های مختلف فراهم کنند. فاکتور مهم دیگر، شکل و ابعاد اتاق است. برای مثال، اگر از یک لوله با قطر ۱۰ اینچ در یک اتاق با مساحت ۲۰ مترمربع استفاده شود، پراکندگی نور به میزانی نخواهد بود که بتواند کل فضا را به طور مناسب روشن کند. در بهترین شرایط یعنی رو به جنوب بودن پشت‌بام، یک لوله صلب با قطر ۲۵ سانتیمتر می‌تواند به مقدار ۲۰۰-۱۵۰ وات نور در فضا منتشر کند. در همین شرایط، این عدد برای یک لوله ۳۶ سانتیمتری به اندازه ۲۵۰-۲۰۰ وات خواهد بود. فاکتور بعدی انتقال نور از لوله‌ها است و بعدی انتشار نور توسط پخش‌کننده می‌باشد و نهایتاً شرایط آب‌وهوایی و محیطی که لوله نوری در آن استفاده می‌شود تأثیرگذار است (مالت دی‌مور و همکاران، ۲۰۱۹). قطر لوله نوری ۵۲ سانتی‌متر غالباً برای کاربردهای سقف استفاده می‌شود زیرا برای انتقال نور روز کافی و نصب آسان در ساختمان مناسب است. لوله‌های نوری با قطر بسیار کم کارایی چندانی ندارند. از طرف دیگر، لوله‌های نوری با قطر بزرگ از بازشدگی زیاد در ساخت سقف و مشکلات مربوط به تحقق عملی رنج می‌برند (جدول ۱). رنج قطر لوله‌های نوری ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر و طول آن ۰.۶ تا ۰.۶ متر و زاویه خم لوله‌ها ۷۵-۵ درجه می‌باشد. لوله‌های نوری می‌توانند تا شدت روشنایی ۵۰۰ لوکس را در ساختمان تأمین کنند.

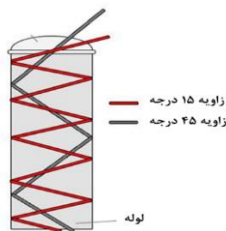
جدول ۱- قطر پیشنهادی برای لوله‌های نوری بر اساس مساحت فضا

| قطر لوله (سانتی‌متر) | مساحت اتاق (مترمربع) | نوع کاربری اتاق |
|----------------------|----------------------|--|
| ۲۳-۲۵ | ۴-۱۰ | راهروها، کابینت، اتاق‌های کوچک |
| ۳۲-۴۵ | ۱۱-۱۵ | راهروهای بزرگ، راه‌پله و دستشویی‌ها |
| ۵۲-۵۵ | ۱۶-۲۲ | آشپزخانه‌ها، اتاق خواب‌ها و اتاق‌های نشیمن |

۷- ویژگی‌ها و کاربردها

لوله‌های نور خورشیدی، در مقایسه با نورگیرهای معمولی و سایر پنجره‌ها، ویژگی‌های عایق حرارتی بهتر و انعطاف‌پذیری بیشتری برای استفاده در اتاق‌های داخلی دارند، اما تماس بصری کمتری با محیط خارجی دارند. در زمینه افسردگی فصلی، ممکن است قابل توجه باشد که نصب اضافی لوله‌های نوری میزان قرارگرفتن در معرض نور طبیعی روزانه را افزایش می‌دهد. در مقایسه با چراغ‌های مصنوعی، لوله‌های نوری از مزیت تأمین نور طبیعی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برخوردار هستند. نور منتقل شده در طول روز متفاوت است. لوله‌های نوری می‌توانند با نور مصنوعی ترکیب شوند. لوله‌های نوری نیازی به تأسیسات برقی یا عایق‌بندی ندارند، بنابراین به‌ویژه برای مناطق مرطوب داخل خانه مانند حمام و استخرها بسیار مفید هستند. از لوله‌های نوری می‌توان در مدارس، انبارها، خانه‌ها، ادارات دولتی، موزه‌ها، هتل‌ها و رستوران‌ها نیز استفاده کرد. لوله‌های نوری روی انواع سطوح قابلیت نصب دارند (شکل ۱۰) و این باعث می‌شود استفاده از این لوله‌ها در ساختمان‌های مختلف امکان‌پذیر باشد. پخش‌کننده‌های نور دارای طراحی‌های متنوعی می‌باشد (شکل ۱۱) که این امر باعث زیبایی دکوراسیون داخلی مخصوصاً در منازل می‌شود.

در لوله‌های نوری زاویه تابش خورشید اهمیت زیادی دارد. هرچه زاویه تابش کوچک‌تر باشد نور بیشتری هدر می‌رود (شکل ۱۲) به دلیل اینکه با زاویه تابش کوچک‌تر میزان بازتاب در لوله بیشتر می‌شود، نوری که به اتاق می‌رسد کمتر می‌شود.



شکل ۱۲- تأثیر زاویه تابش بر جذب انرژی



شکل ۱۱- طراحی‌های متنوع پخش‌کننده‌های نور



شکل ۱۰- انواع سطوح برای نصب لوله نوری

۸- لوله‌های نوری در ایران

در ایران بخصوص قیل از هدفمند شدن بارانه‌ها مطالعات زیادی در زمینه استفاده مستقیم از نور خورشید صورت نگرفته که شاید دلیل آن پایین بودن قیمت برق مصرفی باشد ولی با هدفمند شدن بارانه‌ها در چند سال اخیر تلاش‌هایی صورت گرفته از جمله در زمینه استفاده از لوله‌های خورشیدی در روشنایی ساختمان تحقیقاتی صورت گرفته است (اشکبوس اصفهانی و شجاعیان، ۱۳۹۵). در شرکتی دانش‌بنیان در لرستان و شرکتی در اصفهان تأمین نور از طریق لوله‌های نوری بومی‌سازی شده است. محققان با بومی‌سازی این فناوری و تطبیق آن با اقلیم ایران همچنین بهبود عملکرد سیستم با طراحی ماژولار و افزودن قابلیت‌های بیشتر به این سیستم موفق به ثبت اختراع این سیستم نوین شده‌اند که مجهز به هدایتگر نور در افق پایین (این هدایتگر به افزایش کارایی سیستم در زمان‌هایی مانند اوایل صبح و حوالی غروب که خورشید در افق پایین قرار می‌گیرد) می‌باشد (اسماعیلی و مصطفوی، ۱۳۹۸). این سیستم به‌صورت کاملاً اتوماتیک با خورشید حرکت کرده و نور خورشید را به طبقات پایین منتقل می‌کند. متأسفانه تعداد بسیار محدودی پروژه در ابعاد کوچک در ایران اجرا شده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- نمونه‌های اجرا شده در ایران

۹- آخرین تحقیقات و پیشرفت‌ها در زمینه لوله‌های نوری

در زمینه لوله‌های نوری طی سال‌های اخیر پیشرفت‌های بسیار خوبی در جهت افزایش بازدهی این لوله‌ها مانند ترکیب با تهویه طبیعی، ذخیره‌سازی نور و استفاده همزمان با نور مصنوعی و استفاده از مواد با بازتاب بسیار بالا انجام گرفته است:

۹-۱- ادغام لوله نوری با تهویه طبیعی

یکی از مهم‌ترین مزایای این است که می‌توان دمپرها را طوری برنامه‌ریزی کرد که در طول ماه‌های تابستان به طور کامل در شب باز شوند تا جریان باد غالب باعث ورود هوای تازه به اتاق شود و در زمستان هم دمپرها در حدود ۳ تا ۵ درصد باز شوند که دمای اتاق سرد نشود و تنها هوای اتاق را تهویه کند (شکل ۱۴).

تهویه طبیعی با دو نیروی محرک حاصل می‌شود:

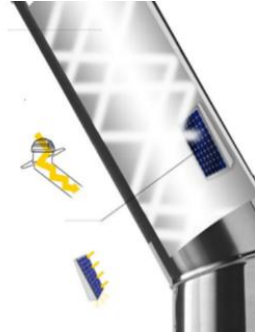
۱. اختلاف دما بین محیط داخلی و خارجی که منجر به اختلاف فشار می‌شود.
۲. اختلاف فشار ناشی از جریان باد در اطراف خروجی لوله.



شکل ۱۴- ادغام لوله نوری و تهویه طبیعی

۹-۲- توسعه مواد با بازتاب بالاتر

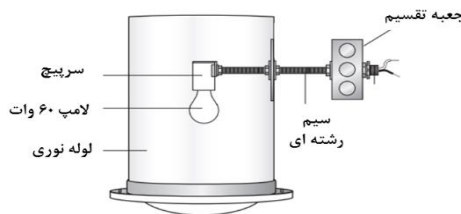
در حال حاضر تولیدکننده‌های لوله‌های نوری توانسته‌اند تا ۹۹٫۷٪ از بازتاب نور برای روشنایی محل موردنظر استفاده کنند. مواد با بازتاب بسیار زیاد شامل: آلومینیوم آنودایز شده^۱ و غشای پلاستیکی پوششی^۲ می‌باشد (شائو^۳ و همکاران، ۱۹۹۷).



شکل ۱۵- استفاده از صفحه‌های خورشیدی درون لوله نوری برای ذخیره انرژی



شکل ۱۶- دایمر در لوله نوری



شکل ۱۷- لوله نوری به همراه کیت نور

۹-۳- استفاده از لوله نوری در شب

برای روشنایی در شب‌ها، لوله‌ها می‌توانند از صفحه‌های خورشیدی^۴ داخلی استفاده کنند تا به اتاق‌ها نور بدهند. همچنین برای روزهای ابری که نور خورشید کافی نیست و برای شب‌ها با کمک سلول‌های خورشیدی نوری را که به شکل انرژی الکتریکی ذخیره کرده توسط LED متصل به صفحه خورشیدی اتاق را روشن می‌کند (شکل ۱۵).

۹-۴- تنظیم نور در لوله های نوری

توسط دایمر^۵ که در لوله نوری قرار می‌دهند می‌توان نور ورودی به اتاق را تنظیم کرد (شکل ۱۶).

۹-۵- اضافه شدن کیت نور به لوله نوری

کیت چراغ را می‌توان در لوله نوری با سیم‌کشی برق به صورت تک لامپ و دو لامپ نصب کرد. کیت نور می‌تواند لامپ‌های استاندارد، CFL (فلورسنت جمع‌وجور) یا LED را در خود جای دهد (شکل ۱۷).

۱۰- روشنایی خروجی لوله‌های نوری در مقایسه با لامپ‌ها

باتوجه به جدول ۲ مشاهده می‌کنیم که نور وارد شده از لوله‌های نوری کاملاً می‌تواند جایگزین لامپ‌ها شود و در روز می‌توان از انرژی رایگان خورشید استفاده کرد.

جدول ۲- مقایسه روشنایی خروجی لوله‌های نوری با روشنایی مصنوعی لامپ‌ها

| مقایسه با روشنایی مصنوعی لامپ‌ها | روشنایی خروجی (lumen) | قطر لوله (mm) |
|----------------------------------|-----------------------|---------------|
| معادل با ۲ لامپ فلورسنت T8 | ۲۰۵۰۰-۱۳۵۰۰ | ۵۳۰ |
| معادل با یک لامپ فلورسنت T8 | ۹۱۰۰-۶۰۰۰ | ۳۵۰ |
| معادل با ۳ لامپ کم‌مصرف ۱۸ وات | ۴۶۰۰-۳۰۰۰ | ۲۵۰ |

۱۱- نمونه‌های اجرا شده لوله‌های نوری در خارج از ایران

در شکل ۱۸ نمونه‌های اجرا شده لوله نوری در مکان مختلف مانند آشپزخانه، راهرو، سرویس بهداشتی، فروشگاه لباس و اتاق نشان داده شده است:

- 1 Anodized aluminum
- 2 Coated plastic film
- 3 Shao
- 4 Solar panels
- 5 Dimmer



شکل ۱۸- نمونه‌های اجرای لوله نوری



شکل ۱۹- اجرای لوله نوری در ورزشگاه دانشگاه علم و تکنولوژی پکن

لوله های نوری



- | | |
|---|--|
| <p>چواب مثبت</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ نصب آسان تر ✓ ○ هزینه کمتر ✓ ○ قابلیت ترکیب با نور مصنوعی ✓ ○ جذب گرمای کمتر ✓ ○ مسدود شدن اشعه های UV در قسمت جذب نور ✓ ○ قابلیت کنترل نور ✓ | <p>چواب منفی</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ ایجاد شبنم در لوله ✓ ○ دید نداشتن به آسمان ✓ |
|---|--|

پنجره های نورگیر سقفی



- | | |
|--|---|
| <p>چواب مثبت</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ به جذابیت اتاق می افزاید ✓ ○ اشعه ماورا بنفش را تا حدی فیلتر می کند ✓ ○ منظره ی آسمان قابل مشاهده است ✓ | <p>چواب منفی</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ نصب سخت ✓ ○ هزینه بالاتر خرید و نصب ✓ ○ گرمای بیشتری جذب می کند ✓ ○ احتمال مشکل نشستی ✓ ○ اشعه های UV باعث آسیب به پوست می شوند ✓ ○ نیاز بیشتر به تمیز کردن ✓ |
|--|---|

شکل ۲۰- مقایسه لوله‌های نوری با پنجره‌های نورگیر سقفی

از جمله مهم‌ترین کاربردهای استفاده از تکنولوژی لوله‌های نوری خورشیدی در ورزشگاه دانشگاه علم و تکنولوژی پکن است که ۱۴۸ لوله نوری خورشیدی با قطر ۵۳۰ میلی‌متر به شکل tube solar در استادیوم نصب شده‌اند. البته این بزرگ‌ترین استادیوم ورزشی دنیا است که از لوله‌های نوری خورشیدی برای روشنایی آن استفاده شده است. به‌وسیله کلکتورهای خارجی که بر روی سقف نصب شده است روشنایی روز از طریق یک سیستم پیشرفته لوله‌های نوری خورشیدی به درون استادیوم هدایت می‌شود و به‌وسیله دیفیوزرها به طور یکنواخت و مؤثری در استادیوم پراکنده می‌شود (شکل ۱۹).

۱۲- مقایسه لوله‌های نوری با پنجره‌های نورگیر سقفی

در شکل ۲۰ جوانب مثبت و منفی لوله‌های نوری و پنجره‌های سقفی نورگیر بیان شده است و با هم مقایسه شده‌اند.

۱۳- فواید و نقاط قوت لوله‌های نوری

لوله‌های نوری بر روان انسان، محیطزیست و ... دارای تأثیر مثبت هستند. در ادامه مواردی از نقاط قوت و فواید لوله‌های نوری را اشاره شده است:

۱. بهبود اثرات روانی به دلیل تابش آفتاب و نور به محل سکونت و کار
۲. کاهش انتشار گازهای آلاینده مورد استفاده در نیروگاه‌ها: می‌توان گفت با به‌کارگیری سیستم روشنایی طبیعی می‌توان سالانه از انتشار بیش از ۲۱ الی ۵۱ هزار تن گاز گلخانه‌ای در جو جلوگیری کرد.
۳. قابلیت نصب سریع و سازگار با هر نوع سطح
۴. کاهش مصرف برق به دلیل تابش آفتاب به داخل محل موردنظر
۵. تابش آفتاب و نور خورشید به واحدهای شمالی ساختمان
۶. عدم انتقال گرما، سروصدا و اشعه ماورا بنفش
۷. در دسترس بودن و قیمت پایین مخصوصاً در مصارف خانگی
۸. قابلیت ادغام نور طبیعی و مصنوعی در یک لوله نوری
۹. جلوگیری از رنگ‌پریدگی مبلمان در مقایسه با پنجره‌های نورگیر
۱۰. تأثیر مثبت بر ترشح هورمون ملاتونین و تنظیم ریتم شبانه‌روز یا سیکل خواب و بیداری
۱۱. عدم وجود خطرات برق‌گرفتگی و اتصالات الکتریکی (قاسمی و صامت، ۱۳۹۳)

۱۴- نقاط ضعف و مشکلات لوله‌های نوری

لوله‌های نوری علی‌رغم فواید و نقاط قوتی که گفته شد دارای نقاط ضعف و مشکلاتی نیز است. یکی از رایج‌ترین اشکالات لوله نور این است که نوری که توسط آن تأمین می‌شود به اندازه کافی نیست که بتواند نور مصنوعی را کاملاً جایگزین کند. دلیل اصلی آن کارایی لوله نوری است که به دلیل بازتاب‌های متعدد نور هنگام انتقال کمتر است. از این رو، یک طراحی مورد نیاز است که بتواند بازتابش نور را در هنگام انتقال کاهش دهد.

جمع‌شدن گردوخاک بزرگ‌ترین مشکل استفاده از لوله‌های نوری خورشیدی است، به‌ویژه در مناطقی که طوفان شن و گردوخاک زیاد است. لازم است که تأثیر جمع‌شدن گردوخاک بر روی کارایی لوله‌های نوری خورشیدی اندازه‌گیری شود و جمع‌کننده نور بایستی در بازه‌های زمانی معین و به منظم تمیز شوند تا گردوخاک برطرف شود. ایجاد شبنم در سطح داخلی جمع‌کننده‌های نور دیگر مشکل بزرگ استفاده از لوله‌های نوری خورشیدی است. به‌رحال ایجاد شبنم، موقتاً در لحظات صبح و شب زمانی که تأثیر جزئی دارد ظاهر می‌شود (اسحاقی و ابراهیمی‌نژاد، ۱۳۹۰).

۱۵- نتیجه‌گیری

سیستم روشنایی با استفاده از نور طبیعی خورشید که در حال حاضر در کشورهای صنعتی و توسعه‌یافته کاربردهای فراوانی در مراکز مختلف درمانی، آموزشی، تجاری و صنعتی پیدا کرده است و حداکثر استفاده از نور خورشید که یک منبع طبیعی محسوب می‌گردد در ساختمان‌ها متداول شده است اما در کشور ما با توجه به پتانسیل عظیمی که در استفاده از این سیستم وجود دارد توجه خاصی به آن نشده است.

باتوجه به عملکرد لوله‌های نوری و تأثیر آن در کاهش آلودگی محیط‌زیست به دلیل تولید کمتر برق در نیروگاه‌ها، همچنین تأثیر مثبت آن در روح و روان به دلیل نور آفتاب در انسان‌ها و تابش مناسب آفتاب در ایران می‌توان نتیجه گرفت استفاده از لوله‌های نوری در ساختمان‌ها در ساعاتی از روز می‌تواند راهکار مناسبی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی باشد. باتوجه به گران‌تر شدن هزینه برق این راهکار می‌تواند از نظر اقتصادی هم در درازمدت برای استفاده‌کنندگان مناسب باشد.

منابع

۱. اسحاقی، سمیرا و ابراهیمی‌نژاد، سمیه، (۱۳۹۰)، «بررسی فنی کاربرد لوله‌های نوری خورشیدی Solar Light Pipes جهت کاهش مصرف برق»، همایش ملی اصلاح الگوی تولید و مصرف، کرمان
۲. اسماعیلی، محمدمهدی و مصطفوی، علیرضا، (۱۳۹۸)، «تحلیل تجربی، اقتصادی و زیست‌محیطی روش‌های روشنایی طبیعی به ساختمان‌های آموزشی و دانشگاهی به‌وسیله بسط نمونه‌های موفق اجرا شده در ایران و جهان»، دومین همایش بین‌المللی دانشگاه سبز، اصفهان
۳. اشکبوس اصفهانی، جواد و شجاعیان، شاهرخ، (۱۳۹۴)، «ساخت یک سیستم انتقال نور کاربردی با هدف تأمین روشنایی یک اتاق با مصرف انرژی صفر»، فصلنامه مهندسی مکانیک جامدات، دوره ۹، شماره ۱، صص ۱۶۵-۱۵۳
۴. بلادر، زهرا، رضازاده، میلاد، رئیسی، زهرا و حریری، محمدمهدی، (۱۳۹۳)، «روش‌های انتقال نور خورشید در فضای مرکزی ساختمان‌های بلند»، اولین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی انرژی خورشیدی، تهران
۵. توکلی، حمیدرضا، (۱۳۹۴)، «لوله خورشیدی انتقال‌دهنده نور طبیعی با سیستم ردیاب مکانیکی»، دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، استانبول
۶. شیروی، ابراهیم، صادقی، هومن، صیادزاده، محمد اسماعیل و صادقی، اکبر، (۱۳۹۵)، «ارزیابی و بهره‌گیری از نور خورشید با استفاده از فیبر نوری در سیستم روشنایی ساختمان»، سومین کنفرانس بین‌المللی فناوری و مدیریت انرژی، تهران
۷. قاسمی، مهدی و صامت، حیدر، (۱۳۹۳)، «سیستم روشنایی خورشیدی با استفاده از فیبر نوری (Solar fiber optic lighting)»، ششمین همایش مقررات ملی ساختمان، شیراز
۸. موسوی ترشیزی، ابراهیم و ابراهیمی، مهیار، (۱۳۹۱)، «مروری بر روش‌های جایگزینی روشنایی مصنوعی با روشنایی خورشید در ساختمان‌ها»، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۷، شماره ۲

9. Beltran, L. (2017). Using Sunlight as a Light Source in Building Cores
10. Callow, J. M. (2003). "Daylighting using tubular light guide systems" (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
11. Hansen, V. G. (2006). "Innovative daylighting systems for deep-plan commercial buildings". PhD Diss., Queensland University of Technology, Brisbane.

12. Hartungi, R. (2009). "Energy-efficient lighting design: A case study in an exclusive spa project". *Journal of Building Appraisal*, 4(4), 287-299.
13. Malet-Damour, B., Bigot, D., & Boyer, H. (2020). "Technological Review of Tubular Daylight Guide System from 1982 to 2020". *European Journal of Engineering and Technology Research*, 5(3), 375-386.
14. Malet-Damour, B., Bigot, D., Guichard, S., & Boyer, H. (2019). "Photometrical analysis of mirrored light pipe: From state-of-the-art on experimental results (1990–2019) to the proposition of new experimental observations in high solar potential climates". *Solar Energy*, 193, 637-653.
15. Rambhad, K., Date, R., Shamkuwar, Sh. (2020). "Daylight Harvesting System: A Review on Light Harvesting Technologies in Commercial Buildings", *International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis (IJAEFEA)*, vol. 1, no. 4, pp. 13-17, 2014.
16. Shao, L., Riffat, S. B., Hicks, W., & Yohannes, I. (1997). "A study of performance of light pipes under cloudy and sunny conditions in the UK". In *Right Light* (Vol. 1, No. 4, pp. 155-159).
17. Sharma, L., Ali, S. F., & Rakshit, D. (2018). "Performance evaluation of a top lighting light-pipe in buildings and estimating energy saving potential". *Energy and Buildings*, 179, 57-72.
18. <https://www.monodraught.com/>
19. <https://solatube.com/residential/tubular-skylights/>