Journal of Structural and Construction Engineering, 12(06), 2025, pp. 24-47

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Evaluation of solar light tube and optical fiber systems using building information modeling with a life cycle cost approach

Seyed Ali Razavi Tabatabaei [1]*, Amirhosein Fathi[2], Sina Mohammadi[3]

1-assisimant Professor, Faculty of Technology and Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran
2-Master's degree, Faculty of Technology and Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran
3-Instructor, Faculty of Technology and Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

ABSTRACT

By utilizing two systems—solar light pipes and fiber optics—it is possible to transfer sunlight to dark interior spaces of buildings. These methods are particularly effective for buildings that, due to their geographical location, cannot efficiently utilize sunlight or for buildings that are primarily used during daylight hours. The main aim of this study is to examine the level of indoor lighting achieved through the use of solar light pipes and fiber optic systems. This assessment is conducted through Building Information Modeling (BIM) with a life cycle cost management approach to maximize the use of solar energy—one of the essential renewable energy sources in human life—and to save on electricity consumption and greenhouse gas emissions over the building's lifespan.In this research, the application of these systems is modeled for a six-story residential building with two units per floor (totaling 12 units) located in the Hakimiyeh area of Tehran. The modeling process first involves the placement of the systems within the building, then the examination of the lighting provided by the systems, and finally, an analysis of costs and the reduction in energy consumption and greenhouse gas emissions.It should be noted that Revit software was used for system placement, while Comsol and DIALux software were used to analyze the lighting levels. From this study, a desirable level of lighting in spaces was achieved, along with a +74% return on investment (ROI) and a cost-benefit index of +0.0003 per square meter for the solar light pipe system. In contrast, the fiber optic system yielded a -43% ROI and a cost-benefit index of -0.0002 per square meter.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 September 2024
Revise Date: 14 November 2024
Accept Date: 16 December 2024

Keywords:
Solar light tube system
Optical fiber system
Building information modeling
Life cycle cost assessment
Natural daylight
Carbon emissions

doi: 10.22065/jsce.2024.462374.3437

*Corresponding author: Seyed Ali Razavi Tabatabaei
Email address: Arazavi@usc.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

ارزیابی سیستم‌های لوله نور خورشیدی و فیبر نوری به کمک مدل‌سازی اطلاعات ساخت با رویکرد هزینه چرخه عمر (مطالعه موردی)

سیدعلی رضوی طباطبائی [۱*]، امیرحسین فتحی [۲]، سینا محمدی [۳]

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
۲-کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
۳- -مربی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

چکیده

با بهره‌گیری از دو سیستم لوله نور خورشیدی و فیبر نوری، امکان انتقال نور خورشید به نقاط تاریک داخل ساختمان وجود دارد. این روش‌ها به خصوص در ساختمان‌هایی که به دلیل موقعیت جغرافیایی خود نمی‌توانند بهره‌وری مطلوبی از نور خورشید داشته باشند یا ساختمان‌هایی که فقط در طول روز مورد استفاده قرار می‌گیرند، اثربخش می‌باشد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی میزان روشنایی داخل ساختمان‌ها از طریق استفاده از دو سیستم لوله نور خورشیدی و فیبر نوری می‌باشد. این بررسی از طریق مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با رویکرد مدیریت هزینه‌های چرخه عمر انجام می‌شود تا میزان استفاده از انرژی خورشید که یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر و حیاتی در زندگی انسان است، به بهترین شکل ممکن افزایش یابد و در مصرف انرژی برق و انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول عمر ساختمان، صرفه‌جویی شود. در این پژوهش، استفاده از سیستم‌های مذکور در یک ساختمان مسکونی شش طبقه دو واحدی (۱۲ واحد) واقع در منطقه حکیمیه تهران مدل سازی شده است. در این مدل‌سازی ابتدا به جانمایی سیستم‌ها در ساختمان، سپس بررسی میزان نوردهی سیستم‌ها و در وهله آخر تحلیل هزینه‌ها و میزان کاهش مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای پرداخته شده است. شایان ذکر است که برای جانمایی سیستم‌ها از نرم افزار رویت و برای بررسی میزان نوردهی، از نرم افزار کامسول و دیالوکس استفاده شده است. از این مطالعه میزان مطلوبی از روشنایی فضاها و نرخ بازگشت سرمایه مثبت ۷۴ درصدی و شاخص سود به هزینه به ازای مترمربع مثبت ۰.۰۰۰۳ برای سیستم لوله نور خورشیدی و نرخ بازگشت منفی ۴۳ درصدی و شاخص سود به هزینه به ازای مترمربع منفی ۰.۰۰۰۲ برای سیستم فیبر نوری منتج شده است.

کلمات کلیدی: سیستم لوله نور خورشیدی، سیستم فیبر نوری، مدل سازی اطلاعات ساختمان، ارزیابی هزینه‌های چرخه عمر، نور طبیعی، انتشار کربن

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۳/۰۶/۲۷	۱۴۰۳/۰۸/۲۴	۱۴۰۳/۰۹/۲۶	۱۴۰۳/۰۹/۲۶	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2024.462374.3437
					https://doi.org/10.22065/jsce.2024.462374.3437

*نویسنده مسئول: سید علی رضوی طبابائی
پست الکترونیکی: Arazavi@usc.ac.ir

۱- مقدمه

رشد جمعیت، توسعه شهرها و فعالیت‌های انسانی موجب مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی و در نتیجه آن افزایش حجم آلاینده‌ها در اتمسفر و در نهایت تشدید گرمایش جهانی و تخریب لایه اوزون شده است. با افزایش تهدیدات ناشی از گرمایش جهانی، نیاز به کاهش مصرف انرژی و سوخت‌های فسیلی مورد توجه جوامع و دولت‌ها قرارگرفته است[۲،۱]. مصرف انرژی با هدف تأمین روشنایی در ساختمان‌ها یکی از عوامل اصلی انتشار کربن می‌باشد که حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی ساختمان‌ها را شامل می‌شود[۴،۳]. علاوه بر این، گرمای حاصل از روشنایی ساختمان‌ها تأثیر قابل توجهی بر گرمایش و سرمایش محیط ساختمان‌ها می‌گذارد.

تأمین روشنایی و جلوه بصری نور یک نیاز برای زندگی انسان است و استفاده از آن برای سلامت، رشد و بهره‌وری انسان ضروری می‌باشد[۵]. پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های روشنایی نوری، فرصت‌های جدیدی را برای منابع روشنایی نوری قابل‌اعتماد با کاربرد وسیع و کارایی بالا ارائه می‌دهد و با توجه به پیشرفت در انرژی تجدیدپذیر، استفاده از سیستم‌های نوری برای کنترل روشنایی فعال می‌تواند ساده، قابل اعتماد و نسبتاً ارزان باشد[۶].

نیاز به ساختمان‌های کارآمد انرژی و درک مزایای فیزیولوژیکی و روان‌شناختی نور طبیعی برای ساکنان، توجیه‌گر توسعه فناوری‌های نوآورانه در زمینه روشنایی روز می‌باشد. این فناوری‌ها، به عنوان سیستم‌های هدایت نور روز تعریف می‌شوند[۷]؛که می‌توانند سطوح نور روز را افزایش دهند و مناطق بیشتری را در ساختمان‌ها نسبت به نوری که از پنجره‌ها حاصل می‌شود، روشن کنند و در نهایت، نیاز به روشنایی الکتریکی و بار سیستم‌های سرمایش ساختمان را کاهش دهند. بنابراین، استفاده این سیستم‌ها به طور بالقوه، مصرف انرژی کلی ساختمان را کاهش می‌دهد و محیط‌های سالم‌تری را برای ساکنان ساختمان فراهم می‌کند. به عنوان نمونه‌هایی از این سیستم‌ها می‌توان به لوله‌های نور، لوله‌های نور آینه‌ای، فیبر نوری و لنزها اشاره کرد.

تا به امروز، تحقیقات بسیاری در حوزه‌های متفاوت سیستم‌های هدایت نور روز همچون طراحی‌های جدید [۹،۸]، بهینه‌سازی طراحی [۱۲-۱۰]، نظارت بر عملکرد[۱۳]، مدل‌های پیش‌بینی [۱۵،۱۴]، شبیه‌سازی[۱۷،۱۶]، مطالعات مقایسه‌ای [۱۸-۲۰]، نظارت برکاربردهای واقعی ساختمان و تجزیه و تحلیل تابش خیره کننده[۲۲،۲۱]، نگرش‌های کاربر و ادراک کاربر[۲۴،۲۳]، ادغام با روشنایی الکتریکی (سیستم‌های هیبریدی) [۲۵]، تحلیل هزینه و چرخه عمر صورت پذیرفته است[۲۷،۲۶] .

هانسن[1] در مطالعه خود نشان داد که انتقال بهتر نور طبیعی در ساختمان‌های اداری، نیازمند استفاده از لوله‌های نور خورشیدی با قطر و طول بیشتر می‌باشد. اما اگر این ابعاد بیش از حد افزایش داده شود، ممکن است محدودیت‌هایی در طراحی ساختمان ایجاد شود. به عنوان دو راهکار برای حل این مشکل، او ابتدا یک جمع‌آور فعال را معرفی کرد که نور طبیعی را با استفاده از یک تابلو فلورسانت جمع‌آوری می‌کند تا اندازه لوله را کاهش دهد. سپس، با پیشنهاد یک جمع‌آور فعال که توانایی چرخش ۳۶۰ درجه در طول شبانه‌روز را دارد، وابستگی سیستم به زاویه شمسی و ارتفاع زاویه را کاهش داد. وی به این نتیجه رسید که عملکرد پنل‌های فلورسانت نور کافی نبوده و قادر به جمع‌آوری مقدار کافی نور طبیعی برای روشنایی ساختمان‌های بزرگ نمی‌باشد[۹].

در بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال نور طبیعی خورشید، تمرکز بیشتر بر روی جمع‌آورهای این سیستم قرار دارد تا بیشترین مقدار نور خورشید را به ساختمان انتقال دهد. این تمرکز به دلیل کاهش زاویه تابش نورخورشید و میزان نور طبیعی در طول روز در فصل زمستان می‌باشد. با استفاده از جمع‌کننده‌های فعال، می‌توان بهترین بهره را از نور طبیعی در طول روز در سیستم کسب کرد[۱۰-۱۲].

در مطالعه‌ای انجام شده توسط پارونچینی[2] و همکاران، یک سیستم لوله نور خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه یک آزمایشگاه بدون پنجره مجهز شده به سیستم لوله نور خورشیدی، با مساحت ۹ متر مربع مورد تحلیل و آزمایش قرارگرفت و میزان روشنایی

[1] Hansen
[2] Paroncini

روز با استفاده از یک لوکس‌متر اندازه‌گیری شد[۱۳]. این مطالعه نشان داد که استفاده از سیستم لوله نور خورشیدی می‌تواند تامین نور لازم را متناسب با آیین نامه‌های موجود برآورد کند.

مطالعه‌ای انجام شده توسط لو ورسو[۳] و همکاران، به بررسی سیستم‌های هدایت نور روز از منظر طراحی و ارائه مدل‌های پیش‌بینی می‌پردازد. این مطالعه به ارزیابی عملکرد فوتومتریکی این سیستم‌ها با استفاده از نور طبیعی متمرکز جهت پیش‌بینی نور طبیعی مستقیم در فضاهای داخلی می‌پردازد. در این مطالعه، با بهره‌گیری از روش‌های تحلیلی مانند روش لومن، استفاده از گنبدهای فعال با پروفیل میکروپریزماتیک یا فیلم‌های میکروپریزماتیک یا هولوگرافیک به عنوان پوشش لوله به منظور بهبود کارایی این سیستم پیشنهاد شده است[۱۵].

داتون و شائو[۴] در مطالعه خود نشان دادند که مدل‌های پیش‌بینی می‌توانند بر اساس رویکرد استفاده شده برای توسعه آنها دسته‌بندی شوند. مدل‌های تجربی از تحلیل نتایج تجربی برخوردار هستند، در حالی که مدل‌های ریاضی بر پایه معادلات عددی نوری ایجاد می‌شوند. داتون باور دارد که مدل‌های تجربی معمولاً در شرایط اقلیمی خاصی مطالعه می‌شوند و تغییرات اقلیمی را در نظر نمی‌گیرند. به عبارت دیگر، این مدل‌ها ممکن است محدودیت‌هایی در انتقال نتایج به اقلیم‌های مختلف داشته باشند. از سوی دیگر، مدل‌های ریاضی نیز نمی‌توانند همه پارامترهای اقلیمی را در نظر بگیرند. در این مطالعه، داتون و شائو به بررسی و ردیابی پرتوهای نوری با استفاده از نرم‌افزارهای مرتبط پرداخته‌اند[۱۶].

سونگ جین اوه[۵] و همکاران، عملکرد سیستم‌های هدایت نور روز با یک لوله نور و یک مراقب اپتیکی خورشیدی با الیاف نوری را به منظور تأمین روشنایی یک کلاس درس مورد ارزیابی قرار دادند. از نرم‌افزار Photopia به منظور مدل‌سازی فوتومتری هر سیستم استفاده شد و تصاویر بازتاب‌شده با شبیه‌سازی روزافزایی در نرم افزار Radiance به منظور نمایش واقع‌گرایانه شرایط نور محیط داخلی ارائه شد[۱۸].

سیونگ شینو[۶] و همکاران نیز به مطالعه‌ی ساختمان‌های اداری چند طبقه با روشنایی سیستم فیبرنوری پرداخته است و مقایسه‌ای بین این روشنایی با سیستم‌های روشنایی سنتی انجام داده است[۱۹].

این پژوهشگران، در مطالعه دیگری روشی را به منظور همسو کردن نور فیبر از طریق متمرکز کننده های سهموی که نور را دریافت و به سمت عدسی تقلیل دهنده متمرکز می‌کند ارائه کرده‌اند. این روش موجب کاهش میزان گرما در محیط می‌شود[۲۰].

یوکسیا[۷] و همکاران، یک سیستم نور خورشیدی هیبریدی را برای تامین روشنایی فضاهای داخلی توسعه دادند. آنها این سیستم را در یک منطقه ۵ متر مربعی آزمایش کردند و بررسی ها نشان داد که از نظر روشنایی این سیستم بهتر از نور مصنوعی است. علاوه بر این، این سیستم به طور قابل توجهی مصرف برق و انتشار کربن را در طول یک سال کاهش داده است [۲۵].

ساپیا[۸] در مطالعه خود، به طراحی یک سیستم با کلکتور سهموی اولیه (PPC)[۹] که نور خورشید را به یک بازتابنده نوری تخت ثانویه که از یک سری آینه‌های سرد ساخته شده، متمرکز می‌کند، می‌پردازد. با این طراحی تنها نور محدوده مرئی طیف خورشیدی را جذب شده و از انعکاس اشعه مادون قرمز جلوگیری می‌شود. همچنین در این مطالعه، مسائل اقتصادی سیستم از نظر کارایی، صرفه جویی متوسط سالانه انرژی و زمان مورد نظر استهلاک اقتصادی نیز مورد بررسی قرار گرفته است[۲۸].

[3] Lo verso
[4] Dutton & shao
[5] Seung jin oh
[6] Seoyong shin
[7] Yuxia
[8] Sapia
[9] PPC: primary parabolic collector

شیائوچون شین[10] و همکاران به منظور بررسی عملکرد سیستم فیبر نوری در یک محیط واقعی، این سیستم را در تونل هواشین[11] چین نصب کرده و مقایسه‌ای بین این سیستم با نورهای مصنوعی انجام دادند. همچنین به مقایسه میزان نوردهی واقعی این سیستم و مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم افزارهای مربوطه، پرداختند[۲۹].

حذف نور طبیعی مستقیم و جایگزینی آن با تکنولوژی‌های انتقال نور خورشیدی می‌تواند بر سلامت و ریتم بیولوژیکی بدن تأثیر منفی بگذارد. نور طبیعی خورشید به تنظیم ریتم شبانه‌روزی بدن کمک می‌کند که نقش مهمی در بهبود کیفیت خواب، سلامت روان و عملکرد سیستم ایمنی دارد. فقدان مواجهه مستقیم با نور خورشید ممکن است باعث کاهش ترشح هورمون ملاتونین در شب و اختلال در چرخه خواب شود. همچنین، این کمبود می‌تواند به کاهش سطح ویتامین D منجر شود که برای سلامت استخوان و سیستم ایمنی بدن حیاتی است[۳۰].

با این حال، سیستم‌های انتقال نور خورشیدی می‌توانند جایگزینی برای نور طبیعی مستقیم باشند و همچنان مزایایی در مقایسه با نور مصنوعی داشته باشند. این سیستم‌ها نور خورشید را به فضاهای داخلی منتقل می‌کنند، اما ویژگی‌هایی مانند شدت یا طیف کامل نور طبیعی خورشید را نخواهند داشت. در نتیجه، ممکن است تأثیرات کامل بر تنظیم ریتم شبانه‌روزی و تولید ویتامین D نداشته باشند، ولی از نظر کیفیت نوری و تأثیر بر سلامت روان و بهبود محیط داخلی، به‌طور کلی از نور مصنوعی برتر هستند.

ضوابط اجرایی و زمانی سیستم‌های هدایت نور خورشیدی در ساختمان شامل تحلیل‌های اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین ملاحظات اجرایی است که به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند. در اجرای این تکنولوژی‌ها، هماهنگی زمانی اهمیت دارد؛ به عنوان مثال، سیستم‌های انتقال نور طبیعی مانند لوله‌های خورشیدی باید در مراحل مشخصی از ساخت نصب شوند تا با سایر عملیات‌های اجرایی تداخلی نداشته باشند. این تجهیزات معمولاً در مراحل نهایی سازه و هم‌زمان با نصب سایر تأسیسات الکتریکی و مکانیکی اجرا می‌شوند تا هماهنگی لازم با دیگر بخش‌های اجرایی ساختمان حفظ شود. همچنین، دستورالعمل‌های نگهداری پس از نصب، برای کاهش هزینه‌های جانبی و افزایش طول عمر تجهیزات ضروری است. رعایت این ضوابط علاوه بر کاهش مصرف انرژی، ارزش اقتصادی و کیفیت زندگی در ساختمان را بهبود می‌بخشد.

با استفاده از روش‌های انتقال نور طبیعی به محیط مسکونی، مانند استفاده از سیستم‌های انتقال نور خورشیدی مورد مطالعه در این گزارش، می‌توان نور مورد نیاز را برای واحدهای مسکونی تأمین کرد و با افزایش محیط قابل سکونت (با حذف نورگیرها)، کارایی و بهره‌وری زمین‌های مسکونی کلانشهرها را افزایش داده و در صورت به صرفه بودن اقتصادی این نوع سیستم‌ها، علاوه بر افزایش سود تولیدکنندگان مسکن که موجب عرضه بیشتر واحدهای مسکونی می‌شود، سبب پایداری توسعه شهری و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود. لذا در این مطالعه با مدل‌سازی ساختمان مسکونی و تعبیه سیستم‌های انتقال نور خورشیدی، به بررسی میزان تأمین نور حاصله از این سیستم‌ها در فضای مسکونی، تحلیل سود و هزینه و در نهایت اثرات استفاده از چنین سیستم‌هایی بر تولید آلاینده‌ها پرداخته می‌شود.

در ادامه این مطالعه، در بخش ۲ روش تحقیق، در بخش ۳ مدل‌سازی، در بخش ۴ نتایج و یافته‌ها و نهایتاً در بخش ۵ نتیجه‌گیری بیان شده است.

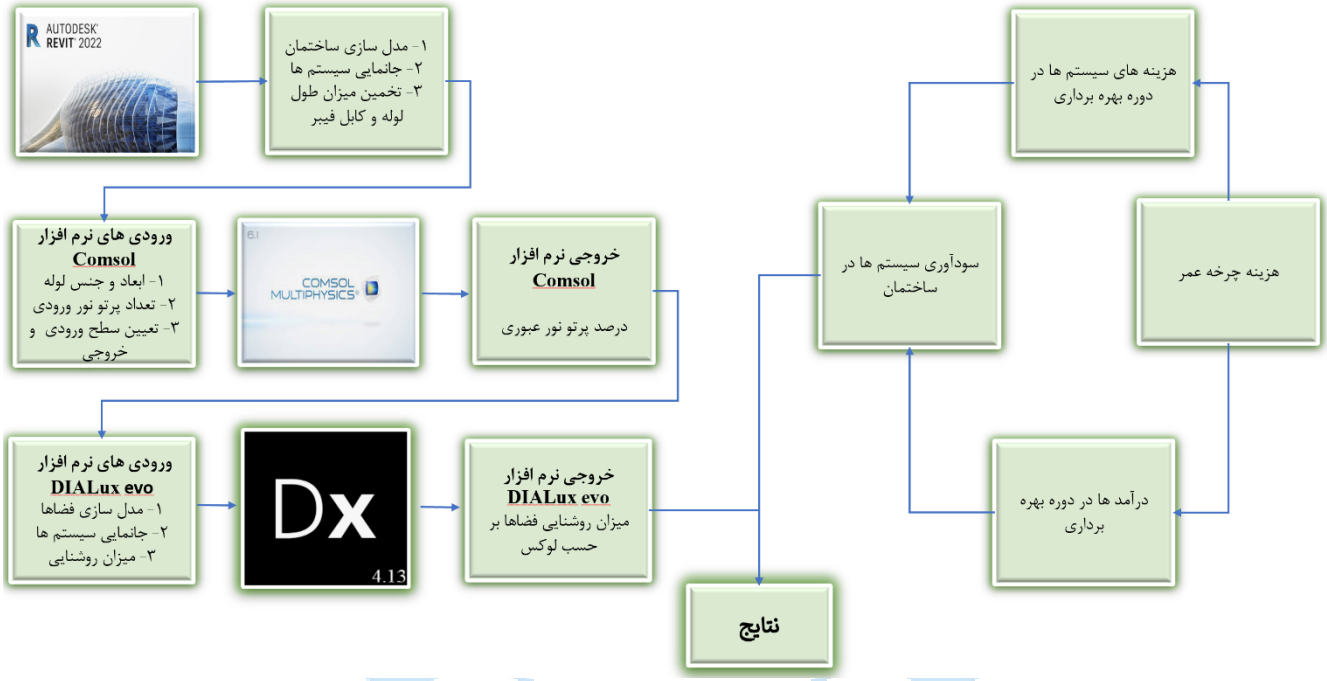
۲- روش تحقیق

در این مطالعه، به منظور ارزیابی میزان نور منتقل شده توسط سیستم لوله نور خورشیدی و فیبر نوری، ساختمان مورد بررسی در نرم‌افزار رویت[12] مدل‌سازی شده است و سیستم‌های لوله نور خورشیدی و فیبر نوری در آن تعبیه شده است. سپس، سیستم لوله نور

[10] Xiaochun Qin
[11] Huashuyan
[12] Revit

خورشیدی با استفاده از نرم‌افزار کامسول[13] مدل‌سازی شده و تحلیل میزان خروجی نور خورشید در آن انجام می‌شود. همچنین، با استفاده از نرم افزار دیالوکس[14]، میزان روشنایی فضاها با استفاده از سیستم‌های انتقال نور طبیعی خورشید بررسی شده است.

پس از مدل‌سازی و انجام تحلیل‌ها، با بهره‌گیری از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، به بررسی انواع هزینه‌های مربوط به این دو سیستم در دوره بهره‌برداری چرخه عمر ساختمان پرداخته می‌شود. این اقدام به منظور ارزیابی سود و هزینه و بررسی به صرفه بودن سیستم‌های انتقال نور طبیعی خورشیدی صورت می‌گیرد و می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری در زمینه بهینه‌سازی استفاده از این سیستم‌ها در ساختمان‌ها کمک کند. در شکل ۱، چارچوب کلی روش تحقیق نشان داده شده است.



شکل۱. چارچوب روش تحقیق

۳- مدل‌سازی

در این مطالعه، یک ساختمان مسکونی واقع در منطقه حکیمیه تهران مدل‌سازی و مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختمان مورد نظر، یک ساختمان شش طبقه دو واحدی (۱۲ واحد) با مساحت ۱۲۵ متر مربع برای هر واحد و بنای غیر مفید کل ساختمان ۲۱۵۹ متر مربع می‌باشد. با توجه به مقررات شهرداری تهران، ساختمان‌های مسکونی جدید الاحداث باید دارای نورگیر باشند، لذا ساختمان مورد بررسی دارای نورگیر می‌باشد. یکی از دلایل اصلی وجود نورگیر تأمین نورکافی برای واحدهای مسکونی می‌باشد. به دلیل وجود نورگیر در این ساختمان، با به‌کارگیری سیستم‌های نور طبیعی می‌توان فضای نورگیر را حذف کرده و به مساحت مفید ساختمان افزود، که از نظر اقتصادی نیز برای پروژه‌های مسکونی جذاب است. همچنین، به دلیل بالا بودن مصرف انرژی روشنایی در ساختمان‌های مسکونی، به‌کارگیری این تکنولوژی‌ها می‌تواند نقش موثری در کاهش هزینه‌های انرژی و مصرف برق این نوع ساختمان‌ها داشته باشد.

[13] Comsol
[14] DIALux

۳-۱. جانمایی سیستم ها در پروژه

با توجه به اینکه کابل‌ها در سیستم فیبر نوری ابعاد کوچکی دارند، امکان عبور کابل‌ها از درون ساختمان میسّر می‌باشد، اما در سیستم لوله نورخورشیدی با توجه به قطر لوله‌ها و اشغال فضای زیاد در اتاق خواب‌ها و سقف کاذب‌ها، از نمای شمالی ساختمان به منظور عبور لوله‌های این سیستم استفاده شده است. از این سیستم‌ها به منظور روشنایی اتاق خواب‌های ساختمان استفاده شده است و همچنین به منظور سودآوری استفاده از این سیستم‌ها، نورگیرهایی که برای روشنایی خواب‌ها استفاده می‌شدند، حذف شده و به متراژ مسکونی اضافه می‌گردند. در این مطالعه، به منظور ارزیابی عملکرد، سیستم‌های لوله نور خورشیدی و فیبر نوری در هر ۲۴ اتاق خواب ساختمان مورد مطالعه مدل‌سازی شده‌اند. شکل های ۲ و ۳، جانمایی این تجهیزات را در ساختمان مورد نظر نشان می‌دهند.

شکل۲. جانمایی سیستم لوله نور خورشیدی در پروژه مسکونی مورد نظر

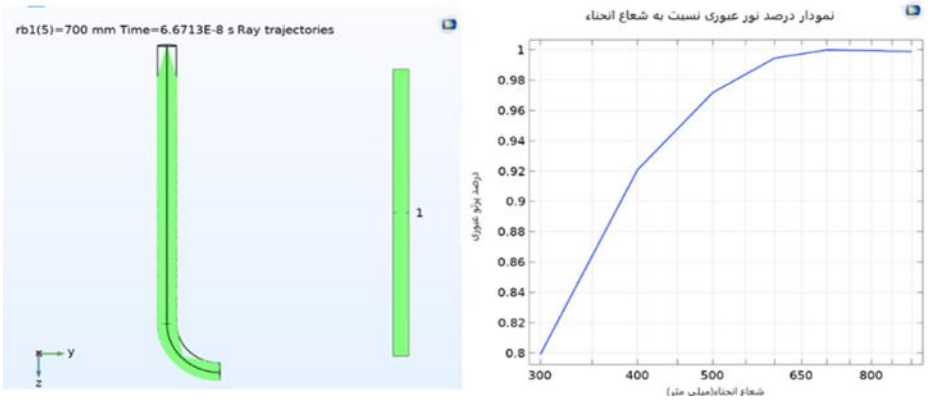
شکل ۳. جانمایی سیستم فیبر نوری در پروژه مسکونی مورد نظر

۳-۲. فرضیات و روش مدل‌سازی

۳-۲-۱. تحلیل سیستم لوله نور خورشیدی مسکونی در کامسول

در این بخش از مطالعه، پس از جایگذاری سیستم لوله نور خورشیدی، این سیستم در نرم افزار کامسول مدل‌سازی شده تا بتوان با استفاده از آن میزان درصد نور عبوری توسط این سیستم را مشخص کرد. در نرم افزار کامسول ابعاد و جنس لوله، تعداد پرتو نور، سطح ورودی و خروجی نور به عنوان ورودی های نرم افزارداده تعیین شده است تا میزان درصد نورعبوری از لوله بدست آید. به دلیل بالا بودن طول لوله‌ها، قطر لوله‌ها به منظور افزایش میزان نوردهی افزایش یافته است. سیستم لوله نور خورشیدی برای طبقه ششم روی بام نصب شده و مستقیماً از سقف وارد اتاق خواب‌ها شده است؛ به همین علت برای آنها خم در نظر گرفته نشده است. شکل ۴، نمونه‌ای از آنالیز سیستم لوله نور خورشیدی در نرم‌افزار Comsol ۶.۱ را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که با افزایش شعاع انحناء، میزان درصد نور عبوری از

داخل لوله افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در این مطالعه، از محصولات شرکت Solatube استفاده شده است، شعاع انحناء مطابق با مشخصات سیستم این شرکت برابر ۰/۸ متر در نظر گرفته شده است[۳۱].



شکل ۴. نمونه تحلیل لوله در نرم افزار کامسول

۳-۲-۲. میزان روشنایی فضاها در دیالوکس

به منظور ارزیابی تفاوت میزان روشنایی فضاهای ساختمان مورد مطالعه، روشنایی با نورهای مصنوعی و سپس میزان روشنایی با سیستم لوله نور خورشیدی و فیبرنوری در نرم افزار DIALux evo ۴.۱۳، اتاق‌خواب‌ها همراه هریک از سیستم ها در این نرم‌افزار مدل‌سازی شده است.

۳-۲-۲-۱. روشنایی نورهای مصنوعی

برای روشنایی اتاق خواب‌ها از دو نوع نورمصنوعی استفاده شده است. برای حاشیه اتاق‌ها از هالوژن مدل هلنا با توان مصرفی ۲۰ وات و در مرکز اتاق‌ها از چراغ مدل الگانس ۶۰×۶۰ با توان مصرفی ۳۸ وات از شرکت مازی‌نور می‌باشد. در شکل ۵، موقعیت اتاق خواب‌ها در نقشه معماری، نشان داده و به اتاق خواب‌های ۱ تا ۴ نامگذاری شده است. شکل ۶، نیز نمونه آنالیز نور مصنوعی اتاق خواب در نرم افزار DIALux evo ۴.۱۳ را نشان می‌دهد. همچنین، در جدول ۱ میزان روشنایی فضاها بر اساس استاندارد روشنایی ایران نشان داده شده است.

شکل۵. موقعیت اتاق خواب های پروژه مسکونی در نقشه معماری

شکل۶. تحلیل نور مصنوعی اتاق خواب مسکونی

جدول ۱. میزان روشنایی فضاها بر اساس استاندارد ایران

عنوان	حداقل میزان نور(لوکس)	حداکثر میزان نور(لوکس)
راهرو های تردد	۵۰	۱۵۰
انبارها	۵۰	۱۰۰
اتاق نشیمن - پذیرائی	۷۰	۲۰۰
رستوران	۱۰۰	۲۰۰
سالن های عمومی	۱۰۰	۲۰۰
کتابخانه	۲۰۰	۵۰۰
اتاق خواب	۵۰	۵۰۰
سرویس بهداشتی	۵۰	۱۰۰
کلاس درس	۲۰۰	۵۰۰
اتاق اداری	۲۰۰	۵۰۰
آزمایشگاه	۴۰۰	۶۵۰
اتاق انتظار و لابی	۱۵۰	۳۵۰

۳-۲-۲-۲. روشنایی سیستم لوله نور خورشیدی

برای تحلیل سیستم لوله نورخورشیدی در دیالوکس، با توجه به آنالیز لوله در نرم افزار کامسول و جدول ۲ میزان شار نوری هر کدام از سیستم‌ها بر اساس لومن بدست آورده شده است و بعداز تحلیل، میزان متوسط شارنوری هر اتاق خواب با جدول ۱مقایسه شده تا میزان روشنایی بر اساس استاندارد تأیید شود.

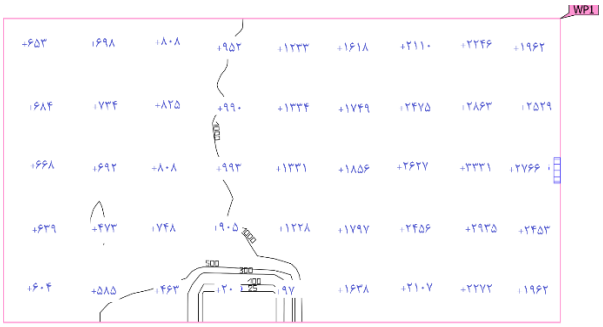
شار نوری داده شده به نرم افزار دیالوکس، بر حسب لومن می‌باشد که با حاصل ضرب میزان نور روز بر حسب لوکس در مساحت فضای ورودی نور بدست می‌آید. لازم به ذکر است که مساحت اتاق‌ها نیز با حذف کامل نورگیر (پاسیو) که در شکل ۷ نشان داده شده است، محاسبه شده است.

درصد نور عبوری از لوله که با استفاده از نرم‌افزار کامسول به دست آمده، در ابتدا در سطح مقطع لوله اعمال شده است و سپس در میزان نور روز در جدول ۲ ضرب گردیده تا میزان نور خروجی بر حسب لومن بدست آید. شکل ۸ نیز، نمونه تحلیل لوله نور خورشیدی در دیالوکس می‌باشد.

شکل۷. موقعیت اتاق خواب های پروژه مسکونی بعد از حذف پاسیو در نقشه معماری

جدول۲. میزان تابش خورشید در روز های مورد نظر بر حسب لوکس [۳۲]

روز	میزان تابش در ساعات مختلف(لوکس)		
	ساعت ۹:۰۰	ساعت ۱۲:۰۰	ساعت ۱۵:۰۰
۱۵ اردیبهشت	۴۳,۰۳۶	۶۱,۵۹۶	۴۹,۰۶۸
۱۵ مرداد	۴۷,۵۶۰	۶۶,۵۸۴	۵۳,۵۹۲
۱۵ آبان	۴۰,۴۸۴	۵۶,۳۷۶	۴۴,۵۴۴
۱۵ بهمن	۳۲,۵۹۶	۴۵,۳۵۶	۴۱,۶۴۴



شکل۸. نمونه تحلیل لوله نور خورشیدی پروژه مسکونی در دیالوکس

۳-۲-۲-۳. روشنایی سیستم فیبر نوری

برای تحلیل فیبر نوری، باید از رابطه ۱ که نشان دهنده میزان نور نسبت به افزایش طول فیبرنوری می‌باشد، استفاده کرد تا میزان نوررسانی هر اتاق در هر طبقه بدست آورد و سپس در نرم افزارDIALux evo ۴.۱۳ تحلیل گرفته شود. درصد نور عبوری بدست آمده از رابطه ۱را در میزان نور روز در جدول ۲ ضرب کرده تا میزان نور خروجی بدست آید.

رابطه ۱:
$$\varphi = \frac{p_0}{p_i} = 10^{-0.002L}$$

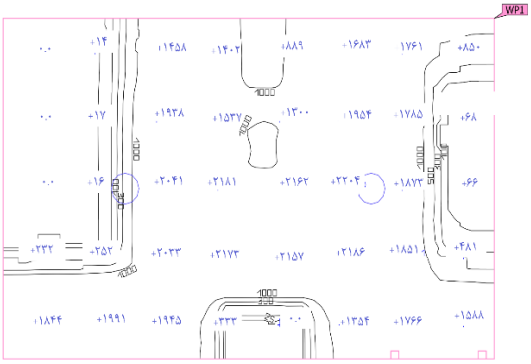
ϕ = درصد نور خروجی

P_i = میزان نور ورودی

P_0 = میزان نور خروجی

L = طول کابل فیبر نوری

سیستم فیبر نوری استفاده شده در این مطالعه، از شرکت Himawari ژاپن است و دارای دو کابل اصلی می‌باشد، که به دو پخش کننده متصل می‌شود[۳۳]. شکل ۹ نمونه تحلیل با نرم افزار DIALux evo با استفاده از سیستم فیبر نوری در پروژه مسکونی می‌باشد.



شکل۹. نمونه آنالیز فیبر نوری پروژه مسکونی در دیالوکس

۳-۲-۳. تحلیل هزینه در چرخه عمر ساختمان

در این بخش، به بررسی هزینه‌های موجود سیستم‌ها در دوره بهره برداری ساختمان پرداخته می‌شود. هزینه‌های خریداری و نصب سیستم‌ها، هزینه نگهداری آنها، میزان صرفه جویی در مصرف برق و هزینه آن، از مواردی می‌باشد که بررسی می‌شود. با بررسی موارد فوق، به بعدهای هزینه و انرژی که جز بعدهای اصلی مدل‌سازی اطلاعات س

در این مطالعه، تحلیل هزینه با بهره‌گیری از **روش بازگشت سرم** گرفته است. ارزیابی این شاخص در پروژه‌های مسکونی به سرمایه‌گذاران این سیستم‌ها در ساختمان‌ها را به‌دقت بررسی کنند. محاسبات بازگشت سرمایه اولیه **ص سود به هزینه به ازای مترمربع** نیز برای سیستم‌ها در ساختمان مسکونی ینه به ازای مترمربع می‌باشد.

رابطه۲:

$$\text{نرخ بازگشت سرمایه} = \frac{\text{کل سود خالص}}{\text{کل هزینه های سرمایه گذاری}} \times ۱۰۰$$

رابطه۳:

$$\text{شاخص سود به هزینه به ازای متر مربع} = \frac{\text{سود}}{\text{مساحت} \times \text{هزینه}}$$

استعلام هزینه‌های سیستم لوله نورخورشیدی، از شرکت SOLAR TUBE SYSTEMS در کشور آمریکا گرفته شده است. پس از محاسبه هزینه خرید و نگهداری سیستم‌ها، میزان کاهش هزینه برق و میزان سودآوری محاسبه شده است. در محاسبات هزینه مصرف برق برای سیستم‌ها، به دلیل نگاه ملی و جهانی به انرژی‌های تجدیدناپذیر و اهمیت آنها، هزینه برق بدون در نظر گرفتن یارانه‌ها محاسبه شده است. همچنین، در محاسبات از قیمت دلار موجود در زمان انجام مطالعه استفاده شده است. نرخ دلار در زمان انجام مطالعه، ۶۵,۰۰۰ هزار تومان و نرخ آزاد مصرف برق، هر کیلووات ساعت ۳,۱۰۰ تومان می‌باشد.

[15] BIM : Building Information Modeling
[16] ROI : Return on Investment

سیستم فیبرنوری استفاده شده در این مطالعه، از شرکت Himawari کشور ژاپن می‌باشد که با مکاتبات انجام شده با این شرکت، برآورد هزینه خریداری و نگهداری سیستم‌ها صورت گرفته است. نرخ ین ژاپن (۱۰۰ ین) در زمان انجام پژوهش برابر با ۳۷,۹۳۹ تومان است. بنابراین، هر ین معادل ۳۷۹/۳۹ تومان است.

لازم به ذکر است که در محاسبات مربوط به هر دو سیستم، هزینه گمرک نیز باید در نظر گرفته شود. هزینه گمرک برای سیستم‌های خورشیدی معادل ۲۴٪ از ارزش واردات آنها است و باید به محاسبات اضافه شود.

۴- صحت سنجی

پارونچینی[17] و همکاران در سال ۲۰۰۷ در ایتالیا یک سیستم لوله نور خورشیدی با قطر ۲۵ سانتی متری و ارتفاع ۱ متری، در یک فضای ۹ مترمربعی قرار دادند و در ماههای مختلف میزان روشنایی سیستم در فضای مورد نظر را مورد ارزیابی قرار دادند[۱۳]. برای بررسی نتایج مطالعه پارونچینی با مطالعه حاضر، نتایج فصل تابستان (بیشترین تابش خورشید) در نظر گرفته شده است. همچنین، فقط میزان روشنایی طبقه ششم ساختمان مسکونی در نظر گرفته شده است تا شرایط مقایسه تا حدودی برابر باشد.

شیائوچون شین[18] و همکاران در سال ۲۰۱۵، سیستم فیبر نوری را با طول‌های مختلف در تونل هواشویان برای بررسی میزان روشنایی تونل قرار دادند. این بررسی در فصل بهار صورت گرفته است[۲۹]. برای مقایسه نتایج این مطالعه با مطالعه حاضر، سیستم‌های فیبر نوری به طول های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر در نظر گرفته شده است که در ساختمان مسکونی سیستم های طبقه سوم، دوم و اول می‌باشد.

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه مطالعات در کشورهای مختلف انجام شده است، شرایط بررسی از جمله میزان تابش نور خورشید و فضای مورد بررسی متفاوت می‌باشد. در جدول ۳، مقایسه نتایج مطالعه حاضر با دیگر مطالعات نشان داده شده است.

جدول 3. مقایسه نتایج

مطالعات	سیستم لوله نور خورشیدی	سیستم فیبر نوری به طول ۱۰متر	سیستم فیبر نوری به طول ۱۵متر	سیستم فیبر نوری به طول ۲۰متر
مطالعه حاضر	۷۳۴	۱۱۳۰	۱۱۰۹	۱۰۸۳
مطالعه پارونچینی	۶۱۷	-	-	-
مطالعه شیائوچون شین	-	۱۰۶۵	۸۹۰	۸۴۱

مطالعات دیگر با مطالعه حاضر

۵- نتایج

[17] Paroncini
[18] Xiaochun Qin

۵-۱. تحلیل روشنایی سیستم لوله نور خورشیدی و فیبر نوری

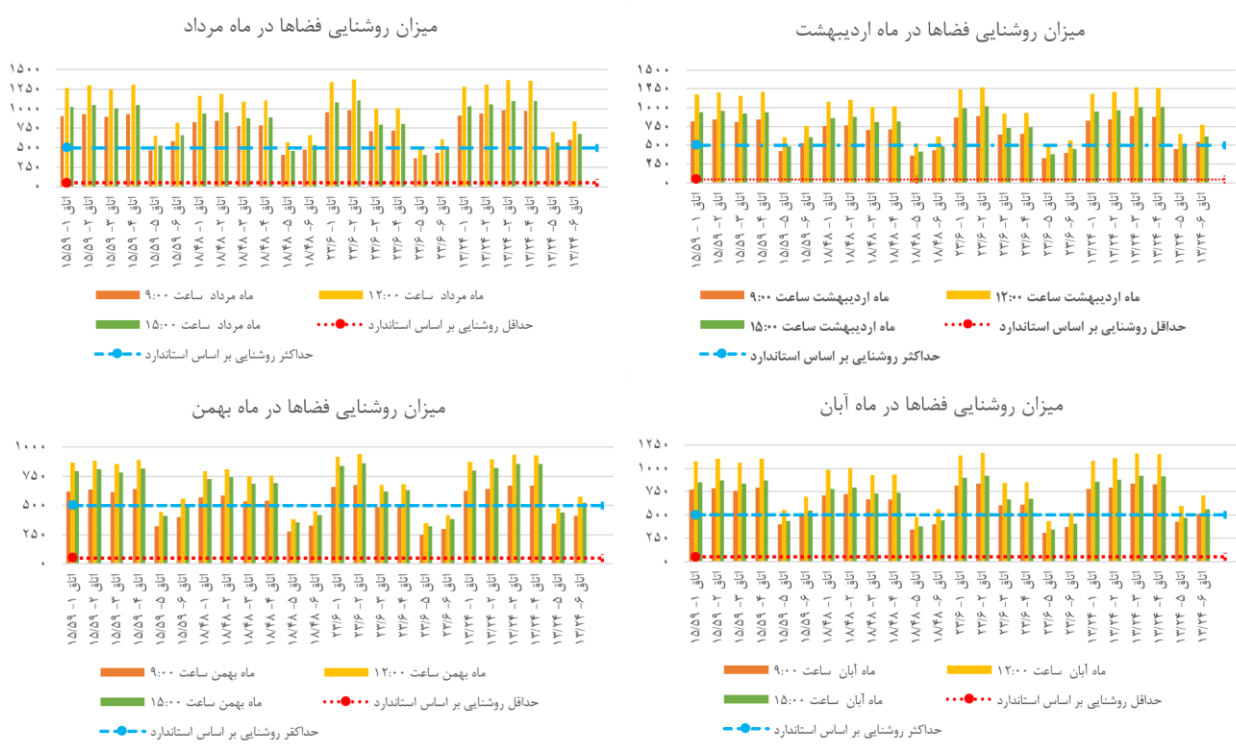
در جدول ۴، تحلیل میزان درصد نور عبوری سیستم لوله نور خورشیدی که با نرم افزار Comsol ۶.۱ انجام شده است، نشان داده شده است. در جدول ۵، میزان شار نوری(روشنایی) نورهای مصنوعی نشان داده شده است. در شکل ۱۰، میزان روشنایی اتاق خواب‌ها با سیستم لوله نور خورشیدی و در شکل ۱۱، میزان روشنایی آنها با سیستم فیبر نوری نشان داده شده است. در شکل ۱۰ و۱۱، هریک از اتاق‌خواب‌ها با دو عدد به عنوان مثال "۱-۱۵/۵۹" نشان شده است که عدد اول به معنای مساحت اتاق خواب مورد نظر و عدد دوم مربوط به طبقه می‌باشد.لازم به ذکر است که هر دو سیستم در مدت زمان روز، توانستند میزان روشنایی استاندارد را تأمین نمایند.

جدول ۴. تحلیل سیستم لوله نور خورشیدی در نرم افزار کامسول برای ساختمان مسکونی

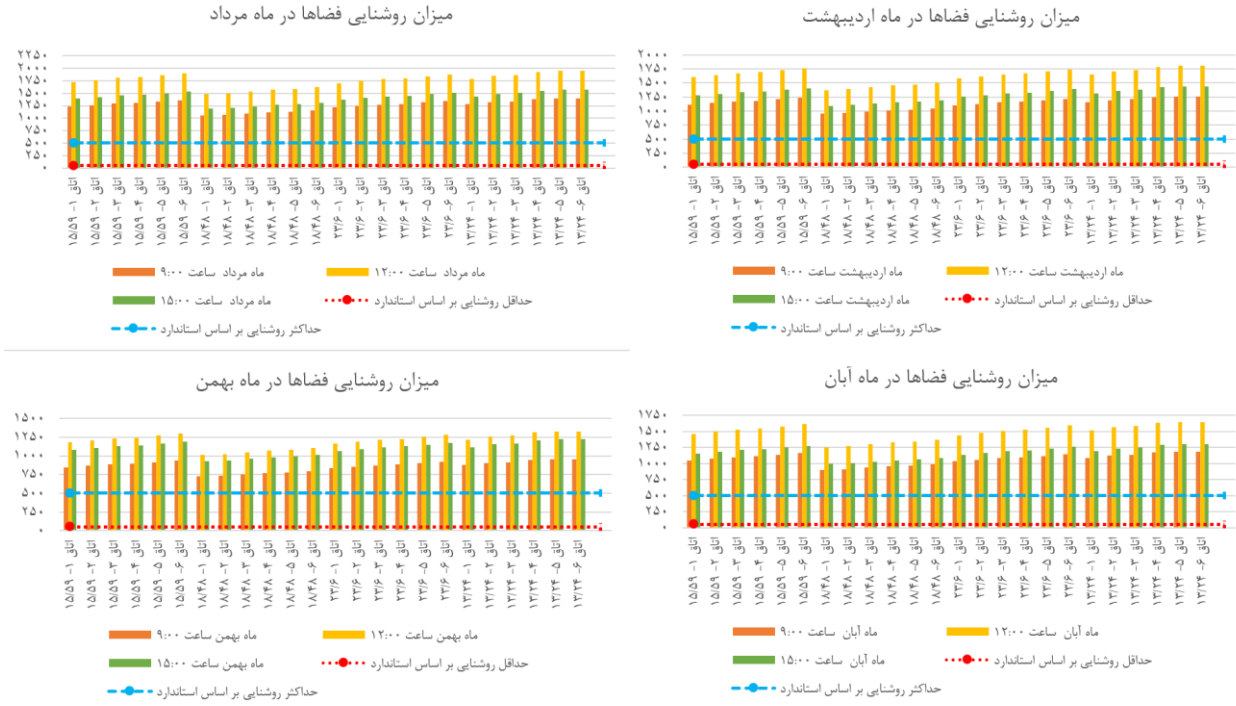
عنوان	طبقه	ارتفاع (متر)	قطر (متر)	شعاع خم (متر)	خم ۹۰ درجه	جنس	درصد نور عبوری
سیستم لوله نور خورشیدی	طبقه ۱	۱۷/۵	۰/۵۵	۰/۸	۱	پلی متیل متاکریلات	۸۶
	طبقه۲	۱۴/۵	۰/۵۵		۱		۸۸
	طبقه۳	۱۱/۵	۰/۳۵		۱		۹۷
	طبقه۴	۸/۵	۰/۳۵		۱		۹۸
	طبقه۵	۵/۵	۰/۲۵		۱		۱۰۰
	طبقه۶	۲/۴	۰/۲۵		۰		۱۰۰

جدول ۵. میزان نوردهی اتاق ها در ساختمان مسکونی با دیالوکس

عنوان	مساحت (متر مربع)	تعداد هالوژن	تعداد چراغ ال ای دی	حداقل شار نوری(لوکس)	حداکثر شار نوری(لوکس)	متوسط شار نوری(لوکس)
اتاق خواب۱	۱۵/۷	۷	۱	۰/۱۹	۱,۳۴۴	۸۹۵
اتاق خواب ۲	۱۵/۰۴	۶	۱	۰/۲۳	۱,۳۱۲	۸۹۷
اتاق خواب ۳	۱۰/۶۴	۴	۱	۰/۵۴	۱,۱۱۹	۸۲۰
اتاق خواب ۴	۸/۶۷	۴	۱	۰/۲۳	۱,۳۷۹	۹۲۲



شکل ۱۰. میزان روشنایی سیستم لوله نور خورشیدی در ماه های مختلف



شکل ۱۱. میزان روشنایی سیستم فیبر نوری در ماه های مختلف

۵-۲. تحلیل هزینه سیستم لوله نور خورشیدی

در ساختمان مسکونی، برای ۲۴ اتاق خواب از سیستم لوله نور خورشیدی بکار گرفته شده است. این سیستم شامل لوله‌های با اقطار مختلف است که براساس طبقات مختلف ساختمان تنظیم شده‌اند. به طور دقیق، برای طبقات ششم و پنجم از لوله‌هایی با قطر ۲۵ سانتی‌متر، برای طبقات چهارم و سوم از لوله‌هایی با قطر ۳۵ سانتی‌متر و برای طبقات دوم و اول از لوله‌های با قطر ۵۵ سانتی‌متر استفاده شده است. هر یک از این لوله‌ها شامل یک جمع‌کننده، یک درپوش جمع‌کننده، یک پخش‌کننده و دو خم ۴۵ درجه متناسب با قطر خود هستند. لازم به ذکر است که لوله‌های مربوط به طبقه ششم بدلیل اینکه مستقیماً از بام وارد فضا می‌شوند، بدون نیاز به خم هستند. جدول ۶، لیست خرید سیستم لوله نور خورشیدی برای ساختمان مورد نظر می‌باشد.

جدول ۶. لیست خرید سیستم لوله نور خورشیدی برای ساختمان مسکونی

لیست خرید سیستم لوله نور خورشیدی(مسکونی)			
عنوان	تعداد	قیمت واحد(دلار)	جمع(دلار)
لوله با قطر ۲۵ سانتی متر	۵۶	۹۰$	۵,۰۴۰$
لوله با قطر ۳۵ سانتی متر	۱۴۰	۹۷$	۱۳,۵۸۰$
لوله با قطر ۵۵ سانتی متر	۲۲۰	۱۱۳$	۲۴,۸۶۰$
جمع کننده ۲۵	۸	۹۷$	۷۷۶$
جمع کننده ۳۵	۸	۱۲۱$	۹۶۸$
جمع کننده ۵۵	۸	۲۳۴$	۱,۸۷۲$
پخش کننده ۲۵	۸	۱۰۴$	۸۳۲$
پخش کننده ۳۵	۸	۱۲۵$	۱,۰۰۰$
پخش کننده ۵۵	۸	۲۳۴$	۱,۸۷۲$
در پوش جمع کننده ۲۵	۸	۱۲۴$	۹۹۲$
در پوش جمع کننده ۳۵	۸	۱۴۱$	۱,۱۲۸$
در پوش جمع کننده ۵۵	۸	۲۳۷$	۱,۸۹۶$
خم ۴۵ با قطر ۲۵	۸	۱۱۴$	۹۱۲$
خم ۴۵ با قطر ۳۵	۱۶	۱۴۳$	۲,۲۸۸$
خم ۴۵ با قطر ۵۵	۱۶	۱۸۱$	۲,۸۹۶$
اتصالات	۲۴	۲۰۰$	۴,۸۰۰$
جمع کل به دلار	۶۵,۷۱۲$		

جمع کل به تومان	۴,۲۷۱,۲۸۰,۰۰۰
جمع کل با احتساب هزینه گمرک	۵,۲۹۶,۳۸۷,۲۰۰

با توجه به استفاده از سیستم لوله نور خورشیدی در اتاق‌های خواب که در زمان روز معادل ۱۲ ساعت می‌باشد، نیازی به استفاده از نور مصنوعی برای روشنایی اتاق‌ها در این زمان نخواهد بود. این موضوع باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های مربوط به نور مصنوعی می‌شود و در نهایت، در سودآوری پروژه تأثیر مثبتی خواهد داشت. همچنین، عمر ساختمان مسکونی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ برابر ۵۰ سال در نظر گرفته شده است[۳۵]. در جدول ۷، صرفه جویی در مصرف برق و هزینه آن آورده شده است.

جدول ۷. صرفه جویی در مصرف و هزینه برق در ساختمان مسکونی با سیستم لوله نور خورشیدی

هزینه برق مصرفی پروژه مسکونی								
عنوان	تعداد	توان مصرفی	ساعات روشنایی	تعداد روز	تعداد سال	قیمت واحد (kwh)	توان مصرفی کل(kwh)	جمع(تومان)
چراغ توکار الگانس ۶۰×۶۰	۲۴	۳۸ وات	۱۲	۳۶۵	۵۰	۳۱۰۰	۱۹۹,۷۲۸	۶۱۹,۱۵۶,۸۰۰
هالوژن مدل هلنا	۱۲۶	۲۰وات	۱۲	۳۶۵	۵۰	۳۱۰۰	۵۵۱,۸۸۰	۱,۷۱۰,۸۲۸,۰۰۰
جمع کل				-			۷۵۱,۶۰۸	۲,۳۲۹,۹۸۴,۸۰۰

در جدول ۸ میزان هزینه‌های مربوط به سیستم لوله نورخورشیدی و هزینه صرفه‌جویی برق نیز آورده شده است. با استفاده از این سیستم، نورگیر (پاسیو) ساختمان حذف شده و فضای آن به واحدها اضافه شده است و در سودآوری تاثیرگذار است. مساحت نورگیر این ساختمان ۱۸ مترمربع و هزینه خرید هر متر مربع این ساختمان ۹۰,۰۰۰,۰۰۰ تومان در نظر گرفته شد. همچنین، مساحت اضافه شده به واحدها، باعث افزایش هزینه احداث سقف ها نیز می‌باشد که به متراژ هر سقف ۱۸ متر مربع (برابر با مساحت نورگیر) اضافه شده است و

هزینه احداث هر متر مربع سقف برابر ۱۵,۰۰۰,۰۰۰ تومان در نظر گرفته شده است. در جدول ۷، میزان سودآوری سیستم لوله نور خورشیدی آورده شده است.

جدول ۸. بررسی سودآوری سیستم لوله نور خورشیدی در ساختمان مسکونی

عنوان	هزینه و درآمد(تومان)
هزینه خرید و نصب سیستم لوله نور خورشیدی	۵,۲۹۶,۳۸۷,۲۰۰
هزینه نگهداری سیستم لوله نور خورشیدی	۰
هزینه احداث متراژ اضافه شده سقف ها	۱,۶۲۰,۰۰۰,۰۰۰
درآمد صرفه جویی مصرف برق	۲,۳۲۹,۹۸۴,۸۰۰
درآمد متراژ اضافه شده به ساختمان	۹,۷۲۰,۰۰۰,۰۰۰
سودآوری(تومان)	۵,۱۳۳,۵۹۷,۶۰۰

با توجه به جدول فوق، این سیستم برای ساختمان مسکونی با توجه به افزایش متراژ درنهایت با سودآوری مثبت همراه می‌باشد. در صرفه جویی انرژی برق نیز تأثیرگذار است و در طول عمر ساختمان۷۵۱,۶۰۸ کیلووات ساعت انرژی برق، صرفه جویی می‌شود. سود این سیستم در پروژه، به ارزش ۵,۱۳۳,۵۹۷,۶۰۰ تومان است. همچنین، نرخ بازگشت سرمایه برابر مثبت ۷۴ درصد و شاخص سود به هزینه به ازای متر مربع مثبت ۰.۰۰۰۳ می‌باشد.

۵-۳. تحلیل هزینه سیستم فیبر نوری

برای هر یک از اتاق‌خواب‌های ساختمان مسکونی یک سیستم فیبر نوری در نظر گرفته شده است. هر یک از اتاق‌ها دارای یک جمع‌کننده، یک پخش‌کننده و یک پایه جمع‌کننده می‌باشد. مقدار کابل مورد نیاز برای هر اتاق خواب به دلیل اختلاف ارتفاع طبقات و فاصله سیستم تا هر اتاق خواب، متغیر است. این مقادیر در جدول ۹، به صورت مجموع کابل بکار رفته، نشان داده شده است.

جدول ۹. هزینه خرید سیستم فیبرنوری برای ساختمان مسکونی

لیست خرید سیستم فیبر نوری هیماواری(پروژه مسکونی)			
عنوان	تعداد	قیمت واحد(ین)	جمع(ین)
جمع کننده	۲۴	¥۶۷۲,۰۰۰	¥۱۶,۱۲۸,۰۰۰
مجموع کابل	۹۵۲ متر	¥۲۳,۰۰۰	¥۲۱,۸۹۶,۰۰۰

پخش کننده	۴۸	¥۲۵,۲۰۰	¥۱,۲۰۹,۶۰۰
پایه زیر جمع کننده	۲۴	¥۱۰,۸۰۰	¥۲۵۹,۲۰۰
اتصالات	۲۴	¥۷۱,۴۰۹	¥۱,۷۱۳,۸۱۶
جمع کل به ین	¥۴۱,۲۰۶,۶۱۶		
جمع کل به تومان	۱۵,۶۳۳,۳۷۸,۰۴۴		
جمع کل با احتساب هزینه گمرک	۱۹,۳۸۵,۳۸۸,۷۷۴		

در جدول۱۰ که مربوط به صرفه جویی در مصرف و هزینه برق می‌باشد، با توجه به اینکه سیستم فیبر نوری هیماواری در قسمت جمع‌کننده نور، دارای ۱۲ عدسی می‌باشد که با حرکت خورشید در حال چرخش هستند تا همیشه عمود بر خورشید قرار بگیرند، به میزان ۲ وات در ساعت برای این چرخش، برق مصرف می‌کنند که در جدول آورده شده است. برای برآورد درآمد حاصل از مصرف برق، این میزان از کل مصرف برق ساختمان کاسته شده است. با توجه به استفاده از سیستم فیبر نوری در اتاق‌های خواب که در زمان روز معادل ۱۲ ساعت می‌باشد، نیازی به استفاده از نور مصنوعی برای روشنایی اتاق‌ها در این زمان نخواهد بود. این موضوع باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های مربوط به نور مصنوعی می‌شود و در نهایت در سودآوری پروژه تأثیر مثبتی خواهد داشت. بنابراین، این میزان هزینه‌ها باید در محاسبات مدنظر قرار گیرد. در جدول ۱۱ نیز، میزان سودآوری سیستم فیبر نوری در ساختمان مسکونی نشان داده شده است.

جدول ۱۰. هزینه خرید سیستم فیبرنوری برای ساختمان مسکونی

هزینه برق مصرفی پروژه مسکونی								
عنوان	تعداد	توان مصرفی	ساعات روشنایی	تعداد روز	تعداد سال	قیمت واحد (kwh)	توان مصرفی کل (kwh)	جمع(تومان)
چراغ توکار الگانس ۶۰×۶۰	۲۴	۳۸ وات	۱۲	۳۶۵	۵۰	۳,۱۰۰	۱۹۹,۷۲۸	۶۱۹,۱۵۶,۸۰۰
هالوژن مدل هلنا	۱۲۶	۲۰وات	۱۲	۳۶۵	۵۰	۳,۱۰۰	۵۵۱,۸۸۰	۱,۷۱۰,۸۲۸,۰۰۰
سیستم فیبر نوری	۲۴	۲وات	۱۲	۳۶۵	۵۰	۳,۱۰۰	۱۰,۵۱۲	۳۲,۵۸۷,۲۰۰
جمع کل			-				۷۴۱,۵۱۲	۲,۲۹۷,۳۹۷,۶۰۰

جدول۱۱. بررسی سودآوری سیستم فیبر نوری در ساختمان مسکونی

عنوان	هزینه و درآمد(تومان)
هزینه خرید و نصب سیستم فیبرنوری	۱۹,۳۸۵,۳۸۸,۷۷۴
هزینه نگهداری سیستم فیبر نوری	۰
هزینه احداث متراژ اضافه شده سقف ها	۱,۶۲۰,۰۰۰,۰۰۰

درآمد حاصل از صرفه جویی مصرف برق	۲,۲۹۷,۳۹۷,۶۰۰
درآمد متراژ اضافه شده به ساختمان	۹,۷۲۰,۰۰۰,۰۰۰
سودآوری(تومان)	-۸,۹۸۷,۹۹۱,۱۷۴

با توجه به افزایش متراژ طبقات و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برق در طول عمر ساختمان، سیستم فیبر نوری برای ساختمان مسکونی به میزان ۷۴۱,۵۱۲ کیلووات ساعت صرفه جویی برق به همراه داشته است اما از نظر اقتصادی به صرفه نمی‌باشد و برای این پروژه سودآوری نخواهد داشت. نرخ بازگشت سرمایه برابر منفی ۴۳ درصد و شاخص سود به هزینه به ازای متر مربع منفی ۰.۰۰۰۲ می‌باشد.

۵-۴. کاهش مصرف انرژی از دید زیست محیطی

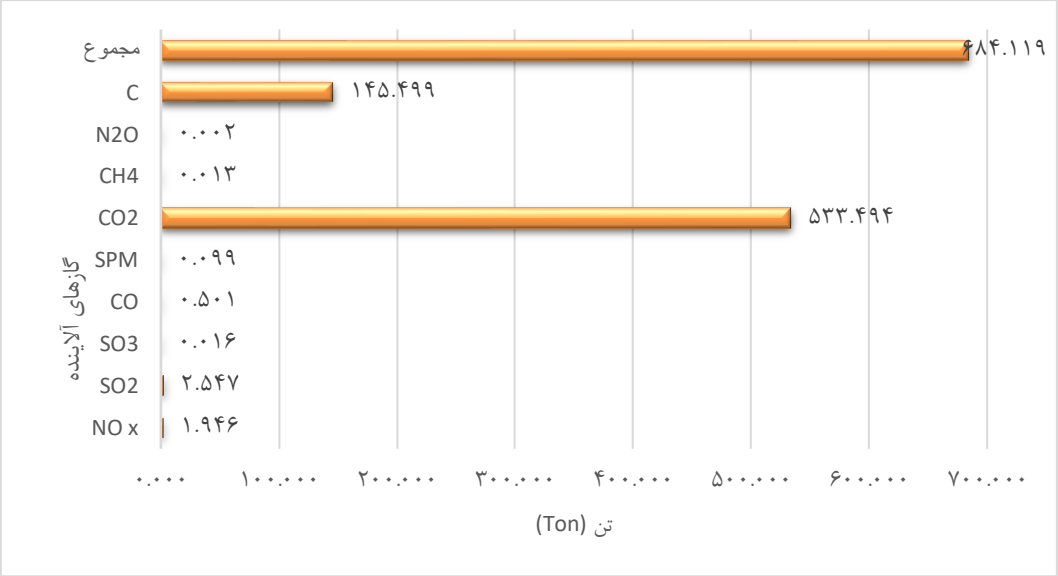
حدود ۸۵ درصد از تولید برق کشور از انواع مختلف نیروگاه‌های حرارتی از قبیل بخاری، گازی و سیکل ترکیبی تأمین می‌گردد. تولید برق در یک نیروگاه سوخت فسیلی برمبنای احتراق سوخت که باعث تبدیل انرژی شیمیایی به حرارت و سپس استفاده از حرارت برای گردش توربین‌ها و ژنراتورها می‌باشد، صورت می‌گیرد. این فرآیند موجب تولید گازهای آلاینده در محیط می‌شود و مقدار این گازها از حاصل سوخت‌های فسیلی جهت تولید یک کیلووات ساعت انرژی الکتریکی که در جدول ۱۲ نشان داده شده است، برابر ۹۲۲/۶gr/kwh می‌باشد[۳۶].

با توجه به میزان صرفه جویی انرژی برق با استفاده از هر یک از سیستم ها در پروژه و جدول ۱۱، میزان صرفه جویی هر یک از گازهای آلاینده در شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

جدول۱۲. انواع گازهای آلاینده تولید شده با یک کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی

نوع گاز آلاینده	NOx اکسیدهای نیتروژن	SO2 دی اکسید گوگرد	SO3 تری اکسید گوگرد	CO مونواکسید کربن	SPM ذرات معلق	CO2 دی اکسید کربن	CH4 متان	N2O مونواکسید نیتروژن	C کربن	جمع
مقدار (gr/kwh)	۲/۶۲۵	۳/۴۳۵	۰/۰۲۲	۰/۶۷۵	۰/۱۳۳	۷۱۹/۴۶۸	۰/۰۱۸	۰/۰۰۳	۱۹۶/۲۱۹	۹۲۲/۶

شکل ۱۲. صرفه جویی گازهای آلاینده با استفاده از سیستم لوله نور خورشیدی



شکل ۱۳. صرفه جویی گازهای آلاینده با استفاده از سیستم فیبر نوری

با توجه به شکل ۱۰و ۱۱، استفاده از سیستم لوله نور خورشیدی در ساختمان مسکونی با صرفه جویی برق که در طول ساختمان صورت می‌پذیرد، میزان ۶۹۳/۴۳۴ تن و همچنین، با استفاده از سیستم فیبر نوری، میزان ۶۸۴/۱۱۹ تن در انتشار گازهای آلاینده صرفه جویی می‌گردد. شایان ذکر است که از میزان کربن نهفته در تولید این دو سیستم، صرف نظر شده است.

۶- نتیجه گیری

امروزه با توجه به اهمیت انرژی‌های تجدیدناپذیر و نگرانی‌های موجود در مورد رو به پایان بودن ذخایر آنها، صنایع مختلف به دنبال تأمین انرژی از منابع جایگزین مانند انرژی خورشیدی هستند. از این رو در صنعت ساختمان نیز این مسئله مورد توجه قرار گرفته است که برای مصرف انواع انرژی می‌توان از آن استفاده کرد. در یک ساختمان مسکونی که شامل ساختمان شمالی با نورگیر (پاسیو) است، استفاده از سیستم‌های هدایت نور روز، امکان حذف نورگیر، کاهش مصرف انرژی برق و افزایش متراژ واحدها را فراهم می‌کند.

این مطالعه به طور کلی بیان می‌کند که استفاده از سیستم‌های لوله نور خورشیدی و فیبر نوری می‌تواند به کاهش مصرف انرژی برق، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش بهره‌وری اقتصادی ساختمان‌ها کمک کند. این سیستم‌ها برای تأمین روشنایی داخلی به جای نور مصنوعی به کار می‌روند و به‌ویژه در ساختمان‌های مسکونی، کارایی بالایی دارند. از منظر چرخه عمر، استفاده از این تکنولوژی‌ها باعث کاهش هزینه‌های برق و بهبود پایداری محیط زیستی ساختمان‌ها می‌شود.

استفاده از این دو سیستم در پروژه مسکونی در این پژوهش، نتایج زیر را به همراه داشت:

۱-هر دو سیستم، میزان روشنایی، مطابق با استاندارد روشنایی ایران را تأمین کردند.

۲-از منظر هزینه، سیستم لوله نور خورشیدی، با نرخ بازگشت سرمایه مثبت ۷۴ درصدی و شاخص سود به هزینه به ازای مترمربع مثبت ۰.۰۰۰۳ در طول عمر ساختمان و سیستم فیبر نوری با نرخ بازگشت سرمایه منفی ۴۳ درصدی و شاخص سود به هزینه به ازای مترمربع منفی ۰.۰۰۰۲ همراه بوده است.

۳-از منظر مصرف انرژی برق، با استفاده از سیستم لوله نورخورشیدی، به میزان ۷۵۱,۶۰۸ کیلووات ساعت و سیستم فیبرنوری به میزان ۷۴۱,۵۱۲ کیلووات ساعت از مصرف انرژی برق، در طول عمر ساختمان صرفه جویی شده است.

۴- از انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از سیستم لوله نورخورشیدی در ساختمان مسکونی، به میزان ۶۹۳/۴۳۴ تن و با سیستم فیبرنوری، به میزان ۶۸۴/۱۱۹ تن کاسته شده است.

۵- بررسی صورت گرفته بر اساس تولیدات این نوع محصولات در خارج از کشور بوده و در صورتی که تهیه و تولید این محصولات در داخل کشور صورت گیرد، نرخ سودآوری آنها به مراتب چشم‌گیرتر خواهد بود.

مراجع

[1] Bešenić, T., Vujanović, M., Besagni, G., Duić, N., & Markides, C. N. (2024). Clean energy technologies and energy systems for industry and power generation: Current state, recent progress and way forward. *Applied thermal engineering*, 123903.

[2] Joel, O. T., & Oguanobi, V. U. (2024). Leadership and management in high-growth environments: effective strategies for the clean energy sector. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, *6*(5), 1423-1440.

[3] Yuan, J., Jiao, Z., Xiao, X., Emura, K., & Farnham, C. (2024). Impact of future climate change on energy consumption in residential buildings: A case study for representative cities in Japan. *Energy Reports*, *11*, 1675-1692.

[4] Iyke, B. N. (2024). Climate change, energy security risk, and clean energy investment. *Energy Economics*, *129*, 107225.

[5] Vu, D. T., Vu, H., Shin, S., Tien, T. Q., & Vu, N. H. (2021). New mechanism of a daylighting system using optical-fiber-less design for illumination in multi-storey building. *Solar Energy*, *225*, 412-426.

[6] Kim, J. T., & Kim, G. (2010). Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. *Building and environment*, *45*(2), 256-269.

[7] Garcia-Hansen, V., & Edmonds, I. (2015). Methods for the illumination of multilevel buildings with vertical light pipes. *Solar Energy*, *117*, 74-88.

[8] Liu, N., Liu, S., Qu, Y., Xu, Y., Cui, Q., & Xin, S. (2024). Performance comparison of different filters based on fibre optic lighting systems and evaluation of architectural lighting effects. *Building and Environment*, *258*, 111576.

[9] Garcia-Hansen, V.R., 2006. Innovative Daylighting Systems for DeepPlan Commercial Buildings Thesis (Ph D), Queensland University of Technology

[10] Garcia Hansen, V., Edmonds, I., & Bell, J. (2009). Improving daylighting performance of mirrored light pipes. *In Paper for 26th International Conference on Passive and Low Energy Architecture: Architecture Energy and the Occupant's Perspective,* PLEA (pp. 308-313).

[11] Nair, M. G., Ganesan, A. R., & Ramamurthy, K. (2015). Conceptual design and assessment of a profiled Fresnel lens daylight collector. *Lighting Research & Technology*, *47*(5), 533-547.

[12] Robertson, A. P., Hedges, R. C., & Rideout, N. M. (2010). Optimisation and design of ducted daylight systems. *Lighting Research & Technology*, *42*(2), 161-181.

[13] Paroncini, M., Calcagni, B., & Corvaro, F. (2007). Monitoring of a light-pipe system. *Solar Energy*, *81*(9), 1180-1186.

[14] CIE, (2006). *Technical Report: Tubular Daylight Guidance Systems*. Vienna, Austria, Commission Internationale de L'Eclairage: 75.

[15] Verso, V. R. L., Pellegrino, A., & Serra, V. (2011). Light transmission efficiency of daylight guidance systems: An assessment approach based on simulations and measurements in a sun/sky simulator. *Solar Energy*, *85*(11), 2789-2801.

[16] Dutton,S.,& Shao, L. (2007). Raytracing simulation for predicting light pipe transmittance. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2(4), 339-358.

[17] Sreelakshmi, K., & Ramamurthy, K. (2024). Daylight performance of collector-diffuser combinations in light pipe systems at different geographical locations. *Solar Energy*, *267*, 112254.

[18] Oh, S. J., Chun, W., Riffat, S. B., Jeon, Y. I., Dutton, S., & Han, H. J. (2013). Computational analysis on the enhancement of daylight penetration into dimly lit spaces: Light tube vs. fiber optic dish concentrator. *Building and environment*, *59*, 261-274.

[19] Ullah, I., & Shin, S. (2014). Highly concentrated optical fiber-based daylighting systems for multi-floor office buildings. *Energy and buildings*, *72*, 246-261.

[20] Ullah, I., & Jong-Woei Whang, A. (2015). Development of optical fiber-based daylighting system and its comparison. *Energies*, *8*(7), 7185-7201.

[21] Marwaee, M. A., & Carter, D. J. (2006). A field study of tubular daylight guidance installations. *Lighting Research & Technology*, *38*(3), 241-258.

[22] Isoardi, G., Garcia Hansen, V., & Hirning, M. (2012). Evaluation of the luminous environment in open-plan offices with skylights. In *Proceedings of the World Renewable Energy Forum (WREF) 2012, Volume 5* (pp. 3818-3825). American Solar Energy Society.

[23] Carter, D. J., & Al Marwaee, M. (2009). User attitudes toward tubular daylight guidance systems. *Lighting Research & Technology*, *41*(1), 71-88.

[24] Garcia-Hansen, V., Isoardi, G., & Miller, E. (2010). Perceptions of daylight quality delivered by light transport systems. In *CIE Conference Lighting Quality and Energy Efficiency, Vienna, Austria* (pp. 1-8).

[25] Lv, Y., Xia, L., Li, M., Wang, L., Su, Y., & Yan, J. (2020). Techno-economic evaluation of an optical fiber based hybrid solar lighting system. *Energy Conversion and Management*, *225*, 113399.

[26] Mayhoub, M. S., & Carter, D. J. (2011). The costs and benefits of using daylight guidance to light office buildings. *Building and Environment*, *46*(3), 698-710.

[27] Carter, D. J. (2008). Tubular guidance systems for daylight: UK case studies. *Building Research & Information*, *36*(5), 520-535.

[28] Sapia, C. (2013). Daylighting in buildings: Developments of sunlight addressing by optical fiber. *Solar Energy*, *89*, 113-121.

[29] Qin, X., Zhang, X., Qi, S., & Han, H. (2015). Design of solar optical fiber lighting system for enhanced lighting in highway tunnel threshold zone: A case study of Huashuyan tunnel in China. *International Journal of Photoenergy*, *2015*(1), 471364.

[30] Wu, Y., Jin, M., Liu, M., & Li, S. (2024). Integrated Systems of Light Pipes in Buildings: A State-of-the-Art Review. *Buildings*, *14*(2), 425.

[31] Solatube. (2024). *Residential skylights, technology*. Retrieved from https://www.solatube.com

[32] Tutiempo Network, S.L. (2024). *Solar radiation in Tehran*. Retrieved from https://en.tutiempo.net/solar-radiation/tehran.html

[33] Himawari Solar. (2024). *Product specification*. Retrieved from https://www.himawarisolar.com

[34] Friedlob, G. T., & Plewa Jr, F. J. (1996). *Understanding return on investment*. John Wiley & Sons.

[35] Road, Housing, and Urban Development Research Center. (2020). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings - Standard No. 2800* (4th ed.). Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran.

[36] Solaymani, S. (2021). A review on energy and renewable energy policies in Iran. *Sustainability*, *13*(13), 7328.