



فصل نامه علوم و مهندسی گرمسار

Journal Homepage : <https://journal.fmgarmsar.ac.ir/>



دانشگاه گرمسار

مقاله کامل پژوهشی

تاثیر زاویه لوور خارجی بر مصرف انرژی ساختمان اداری کوتاه مرتبه در اقلیم گرم و خشک تهران

امیر نظامی^{*}، کارشناسی ارشد، دانشکده معماری، دانشگاه گرمسار

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از لوورها به عنوان سایبان در ساختمان‌های اداری به یک استاندارد رایج تبدیل شده است. این استفاده به دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش نیاز به صرفه‌جویی در مصرف انرژی، به یک ضرورت تبدیل شده است. با توجه به این که ساختمان‌ها سهم قابل توجهی در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند، بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های سایبان مانند لوورها می‌تواند به بهبود کارایی انرژی و کاهش هزینه‌های انرژی کمک کند. عملکرد این لوورها به شدت به زاویه آن‌ها بستگی دارد و می‌توان آن را از زوایای مختلفی مانند نور روز، بارهای حرارتی، آسایش بصری، تهویه طبیعی و مصرف انرژی مورد بررسی قرار داد. هدف این پژوهش، تعیین زاویه بهینه لوورهای خارجی در ساختمان‌های اداری بر اساس بهره‌وری از انرژی خورشیدی و میزان انرژی مصرفی است. برای رسیدن به این هدف، یک ساختمان نمونه با نصب لوورهایی در سه جبهه جنوبی، شرقی و غربی در ۱۷ حالت مختلف طراحی و شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر (Design Builder) در تهران انجام گردیده است. نتایج این تحقیق، هم‌سانی با پژوهش‌های قبلی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که زاویه بهینه لوورها به نوع اقلیم وابسته است. در تمام حالات بررسی شده، استفاده از لوور منجر به کاهش بهره خورشیدی نسبت به ساختمان‌های بدون لوور شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای ساختمان‌های اداری با ارتفاع کم در تهران، زاویه بهینه لوور در جبهه جنوبی، جبهه شرقی و جبهه غربی به ترتیب ۷۰+، ۴۰-، ۵۰+ درجه می‌باشد. هم‌چنین، مصرف انرژی در این حالت‌های بهینه بین ۹،۴ تا ۲۸،۲۹ درصد کاهش یافته است.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

کلیدواژه‌ها:

زاویه بهینه لوور،

بهره خورشیدی،

مصرف انرژی،

تهران،

ساختمان اداری کوتاه مرتبه.

عهده‌دار مکاتبات: امیر نظامی

نشانی: ایران، استان سمنان، شهرستان گرمسار، دانشگاه گرمسار

پیام نگار: amiir.nezami@gmail.com

۱- مقدمه

افزایش جمعیت جهان به طور مستقیم به افزایش تقاضا برای انرژی‌های فسیلی منجر می‌شود. این در حالی است که سوخت‌های فسیلی، از جمله زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی، به عنوان منابع اصلی تأمین انرژی در بسیاری از کشورها محسوب می‌شوند. با افزایش مصرف این منابع، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتیجه این روندها، گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی شدید است که می‌تواند به عواقب زیست‌محیطی و اجتماعی جبران‌ناپذیری از جمله افزایش دما، تغییر در الگوهای بارش و افزایش پدیده‌های طبیعی نظیر سیلاب‌ها و طوفان‌های شدید منجر شود. در ایران، تقریباً ۴۰ درصد از انرژی مصرفی به بخش ساختمان اختصاص دارد و نیمی از بار حرارتی و برودتی از طریق پنجره‌ها هدر می‌رود [۱]. از این رو، استفاده از شیشه‌های عایق و تابش‌بندها به منظور تنظیم نور و تابش خورشید ضروری است [۲].

معمولاً پنجره‌های وسیع برای جذب حرارت خورشیدی، ایجاد نمای خارجی و بهره‌مندی از نور طبیعی به کار می‌روند، اما این موضوع می‌تواند به افزایش دمای داخلی در تابستان، به ویژه در اقلیم‌های گرم و در نتیجه افزایش نیاز به بار سرمایشی و ایجاد خیرگی بصری منجر شود. هم‌چنین، در ساختمان‌های اداری حتی در اقلیم‌هایی با بار گرمایش غالب، بار سرمایشی معمولاً بیش از گرمایش است [۳]. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت راهکارهای کنترل سایه در طراحی ساختمان‌های اداری است. انتخاب نادرست سیستم‌های سایبان می‌تواند نیاز به گرمایش و روشنایی الکتریکی را افزایش دهد و هم‌چنین خیرگی را به وجود آورد.

در چند سال اخیر، استفاده از لوورها به عنوان سایبان‌های پیشرفته به ویژه در ساختمان‌های اداری رایج شده است. نتایج تحقیقاتی که بر روی ساختمان اداری دانشگاه اردن انجام شده، تأثیر سایبان‌های مختلف را بر

روی دمای هوا، کیفیت بصری و تعامل کاربران نشان می‌دهد. در این مطالعه، سه نوع سایبان ثابت (تیغه عمودی، مورب و شانه تخم‌مرغی) در سه اتاق با استفاده از مصالح موقت و دائمی در دو مرحله نصب و مورد بررسی قرار گرفتند. شبیه‌سازی‌هایی که با استفاده از نرم‌افزارهای IES/SunCast و Radiance برای یک سال انجام شده، کاهش دما به سطح قابل قبول و افزایش شدت روشنایی را تأیید می‌کند. بهبود محیط بصری و یکنواختی روشنایی نیز با کنترل شدت روشنایی و حذف خیرگی انجام می‌شود. در این خصوص، سایبان‌های مورب و شانه تخم‌مرغی عملکرد بهتری داشته‌اند [۴].

برای ارزیابی مؤثر عملکرد لوورها، بررسی هم‌زمان مصرف انرژی، آسایش حرارتی و بصری ضروری است. در یک ساختمان اداری استاندارد در دانمارک، شبیه‌سازی یکپارچه نور روز و حرارت به منظور ارزیابی مصرف انرژی و کیفیت محیط داخلی انجام شده است. با توجه به اهمیت پارامترهای جهت‌گیری، سطح پنجره و نوع سایبان به عنوان عوامل طراحی در مراحل اولیه، برنامه‌ای با منبع باز توسعه داده شده که روابط بین این پارامترها را نشان می‌دهد. عوامل ارزیابی شامل سرمایش، گرمایش، روشنایی مصنوعی و فاکتور نور روز هستند [۵]. در یک مطالعه انجام‌شده در اقلیم‌های سرد، راهبردهای کنترل سایه به منظور بررسی نیازهای سرمایش، گرمایش و نور روز در ساختمان‌های اداری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش، شبیه‌سازی یک ساختمان اداری با جهت‌گیری شمالی-جنوبی و با سطوح و ویژگی‌های مختلف پنجره‌ها انجام شده است [۶]. در اقلیم سرد دانمارک، یک راهبرد کنترلی شامل ترکیبی از سایبان‌های داخلی و خارجی طراحی شده و عملکرد آن از جنبه‌های خیرگی، کارایی نور روز و دید به خارج با سایبان‌های ونیزی مقایسه شده است. در اقلیم‌های نسبتاً سرد، به دلیل هزینه‌های اولیه، ممکن است استفاده از سایبان‌های خارجی به تنهایی بر سایبان‌های خودکار ترجیح داده شود [۷].

پالمرو ماررو و الیوریا [۸]، تأثیر سایه‌اندازی لوورها بر

مصرف انرژی بین ۲۴ تا ۲۵ درصد است، در حالی که با استفاده از لوورهای دینامیک پیشنهادی، صرفه‌جویی برای نماهای جنوبی، شرقی و غربی به ترتیب ۳۴، ۲۸/۵ و ۳۰/۳ درصد است. زاویه بهینه برای لوور ثابت در نمای جنوبی ۲۰- درجه و برای نماهای شرقی و غربی ۲۰+ درجه تعیین شده است. در صورت استفاده از لوورهای با زاویه بهینه، میزان صرفه‌جویی انرژی کمی کمتر از نمای دینامیک است. بنابراین، با توجه به هزینه‌های اولیه و نیاز به تعمیر و نگهداری، لوور با زاویه ثابت به عنوان گزینه‌ای مناسب در نظر گرفته می‌شود.

در مطالعات گذشته، عملکرد لوورها از جنبه‌های مختلفی نظیر تأمین نور روز، سایه‌اندازی، بار سرمایش و گرمایش، تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی کلی ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌طور معمول، ساختمان‌هایی که دارای فضاهای عمیق هستند، به شدت به روشنایی الکتریکی وابسته هستند. نورپردازی دینامیک با ترکیب روشنایی الکتریکی و به حداکثر رساندن استفاده از نور روز، نفوذ نور طبیعی را افزایش داده و با توزیع بهینه این نور، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. سیستم‌های با لوورهای ثابت علاوه بر ایجاد موانع در دید، قابلیت تنظیم روشنایی براساس تغییرات نور روز را ندارند و نیز می‌توانند هزینه‌بر باشند. سایبان‌های بهینه به افزایش سطوح روشنایی طبیعی کمک کرده و نور اضافی خورشید را کنترل می‌کنند که در نتیجه نواقص مربوط به آسایش و خیرگی را کاهش می‌دهد. برای کاهش جذب حرارت خورشیدی، لازم است سایبان‌ها در فضای خارجی نصب شوند. در برخی تحقیقات، پتانسیل نور روز با استفاده از سیستم لوور ثابت تحت شرایط واقعی نور خورشید و وضعیت آسمان مورد سنجش قرار گرفته است [۱۲].

فریوان و همکاران [۱۳]، تأثیر هندسه بام را بر عملکرد لوورها از طریق آزمایش مدل فیزیکی و شبیه‌سازی رادیانس بررسی کردند. این مطالعه که در یک اقلیم گرم و مرطوب انجام شده، عملکرد نور روز را با ارزیابی میزان روشنایی و یکنواختی توزیع آن ارزیابی کرده است. نتایج نشان می‌دهد

نیازهای انرژی ساختمان‌ها را در پنج شهر (مکزیکو، قاهره، لیسبن، مادرید و لندن) در جهات مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار Transys، دما و نیازهای سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها با سطوح مختلف پنجره و لوورهای افقی و عمودی تحلیل شده است. پارامترهای هندسی شامل تعداد لوورها، فاصله بین آن‌ها، محل نصب لوورها در بالای پنجره و میزان لوور برای سطوح مختلف پنجره در شهرهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که محل و ابعاد پنجره و زاویه لوور از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی هستند. استفاده از لوورها در شهرهای قاهره، لیسبن و مادرید که دارای اقلیم گرم هستند، منجر به صرفه‌جویی بیشتری در انرژی به دلیل تابش شدید خورشید و دماهای بالای خارجی در تابستان می‌شود. در مقابل، در لندن، استفاده از لوورها در تمام طول سال به علت کاهش جذب حرارت در زمستان، منجر به افزایش مصرف انرژی کلی نسبت به ساختمان‌های بدون سایبان می‌گردد.

لوورها هم‌چنین می‌توانند در برخی از اجزای سیستم‌های سرمایشی ایستا مورد استفاده قرار گیرند. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که زاویه لوورهای خارجی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد تهویه در دودکش‌های خورشیدی دارد و زاویه بهینه لوور بین ۳۵ تا ۴۰ درجه است که به بهبود سرعت و فشار هوای دودکش کمک می‌کند [۹]. مطالعات میدانی در ایرلند نشان می‌دهد که در ساختمان‌های با کارایی انرژی بالا که تهویه طبیعی از طریق سایبان‌های لوور فراهم می‌شود، بازشوهای کوچک‌تر احساس حرارتی بهتری نسبت به پنجره‌های بزرگ‌تر ایجاد می‌کنند [۱۰]. حامد و ابوهیجله [۱۱]، تأثیر لوورهای دینامیک را بر مصرف انرژی یک ساختمان اداری در ابوظبی با استفاده از نرم‌افزار IES بررسی کرده‌اند. در این مطالعه، لوورها در نماهای جنوبی، شرقی و غربی قرار داده شده و با حسگرهای نوری مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از حسگرهای نوری، میزان صرفه‌جویی در

با پوشش سلول‌های فتوولتائیک ترکیب شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. این تحقیق بر روی یک اتاق اداری انجام شده و متغیرهای مورد بررسی شامل زاویه شیب و تعداد پره‌های لوور هستند که عملکرد آن‌ها در ارتباط با تغییرات فصل و زاویه تابش خورشید بر روی جبهه جنوبی ساختمان سنجیده شده است [۱۸].

با توجه به استفاده گسترده از لوورها در ساختمان‌های عمومی، برخی مطالعات به بررسی تأثیر این سازه‌ها بر تهویه طبیعی پرداخته‌اند. به عنوان مثال، در تحقیقی که در ایتالیا انجام شده و هدف آن بهینه‌سازی محل نصب لوورها به منظور افزایش آسایش حرارتی داخلی بوده، نشان داده شده است که در یک ساختمان دو طبقه با آتریوم، استفاده صحیح از لوورها بهبود عملکرد تهویه طبیعی و کاهش دمای اوج داخلی را به همراه دارد [۱۹].

مطالعه‌ای میدانی در ایرلند بر روی تهویه یک‌طرفه با استفاده از نیروی باد و لوورهای قابل باز شدن نشان داده است که نرخ تعویض هوا در این حالت به میزان ۵/۶٪ بیش‌تر از حالت بازشوی مسطح است. یافته‌ها نشان می‌دهند که برای پنجره‌های رو به باد، انحنای لوورها با مقطع مقعر به افزایش سرعت باد و نرخ تعویض هوا در ساختمان‌های با سیستم تهویه یک‌طرفه کمک می‌کند [۲۰].

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر لوور بر بهره‌وری خورشیدی، روشنایی و بار سرمایش و گرمایش در ساختمان‌های اداری است. در این راستا، تأثیر زاویه لوور بر ورود نور طبیعی، بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی کاربران مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین، با تعیین بهینه‌ترین زاویه لوور برای هر یک از سه جبهه جنوبی، شرقی و غربی ساختمان‌های اداری در تهران، می‌توان به طراحی بهتری در راستای مدیریت انرژی ساختمان‌ها دست یافت. این تحقیق براساس داده‌های اقلیمی تهران و تحلیل‌های شبیه‌سازی انرژی انجام می‌شود تا نتایج معتبر و قابل اجرایی به‌دست آید. از این طریق، علاوه بر کاهش هزینه‌های انرژی، آسایش حرارتی و بصری کارکنان نیز بهبود خواهد یافت.

که با تغییر هندسه بام، عملکرد لوورها بهبود یافته و سطح روشنایی در قسمت‌های انتهایی اتاق و نزدیک پنجره نسبت به اتاق‌هایی با بام افقی افزایش می‌یابد. در یک روش پیشنهادی، استفاده از تصاویر آسمان برای کنترل سایبان‌های خودکار مطرح شده است. در این روش، سه مدل مختلف آسمان (آفتابی، نیمه‌ابری و ابری) و لوورها در حالت‌های نیمه‌باز و بسته در هفت سناریوی مختلف با تغییر نوع تابش و طیف بصری آسمان، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. این روش امکان کنترل لوورهای پنجره را بدون نیاز به اندازه‌گیری مقادیر نوری و تجهیزات اضافی فراهم می‌کند [۱۴]. با استفاده از شبیه‌سازی IES-VE، پسته‌های خارجی ساختمان‌ها در کره جنوبی از نظر روشنایی روز، تأمین دید بهتر و نیازهای سرمایش و گرمایش بررسی شده است. این مطالعه سایبان‌های افقی، لوورهای روی پنجره، قفسه‌های نوری و لوورهای زاویه‌دار پیشنهادی را با یکدیگر مقایسه کرده است [۱۵]. اخیراً در یک پژوهش، سیستم لوور جدید با کانال‌های بسیار ظریف مایع معرفی شده است که قابلیت تنظیم دائمی لوورها را براساس شرایط اقلیمی و موقعیت خورشید فراهم می‌کند [۱۶]. در استفاده از پنجره‌های معمولی، توزیع نور در فضا یکنواخت نیست و از این‌رو، قفسه‌های نوری، لوورهای ثابت و متحرک انعکاسی، کف‌های پنجره بازتابی، شیشه‌های منشوری و لوله‌های نوری به منظور توزیع یکنواخت نور روز توصیه شده‌اند.

هاشمی [۱۷]، عملکرد سایبان خورشیدی را در یک سیستم نوآورانه با استفاده از لوور انعکاسی ارزیابی کرده است. شاترهای حرارتی خودکار با پنل‌های پیشرفته به عنوان سایبان و همچنین سیستم نور روز عمل می‌کنند و امکان تغییر و کنترل مستقلی از هر یک از لوورها یا شاترها را فراهم می‌آورند. این سیستم به توزیع بهتر نور روز کمک کرده و نیاز به روشنایی الکتریکی را تا ۶۰٪ کاهش می‌دهد. همچنین، این سیستم با ممانعت یا انعکاس نور خورشید، تأخیری کوتاه در افزایش دمای داخلی ایجاد می‌کند که از نظر حرارتی مطلوب است.

در یک تحلیل پارامتری، عملکرد سیستم لوور ثابت که

۱-۱- اقلیم تهران

به منظور طراحی معماری سازگار با محیط زیست، گام نخست، ارزیابی دقیق عوامل اقلیمی حاکم بر منطقه مورد نظر است. براساس سیستم طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، تنوع اقلیمی ایران شامل چهار دسته اصلی: گرم و مرطوب، گرم و خشک، سرد، و معتدل و مرطوب است که توزیع جغرافیایی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش، شهر تهران به عنوان نمونه موردی انتخاب شده است، که براساس این طبقه‌بندی، در ناحیه اقلیمی گرم و خشک قرار می‌گیرد (شکل

۱). انتخاب شهر تهران به عنوان نمونه مطالعاتی با توجه به اقلیم گرم و خشک آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این اقلیم، با ویژگی‌هایی نظیر تابش شدید خورشید، دمای بالای هوا در طول روز، کمبود رطوبت و اختلاف دمای زیاد بین شب و روز، چالش‌های خاصی را در طراحی ساختمان‌ها ایجاد می‌کند. در این شرایط، معماران و طراحان نیازمند به‌کارگیری راهکارهای طراحی اقلیمی هستند که بتوانند با کاهش اثرات منفی این شرایط، آسایش حرارتی را در داخل ساختمان‌ها فراهم کرده و مصرف انرژی را به حداقل رسانند.

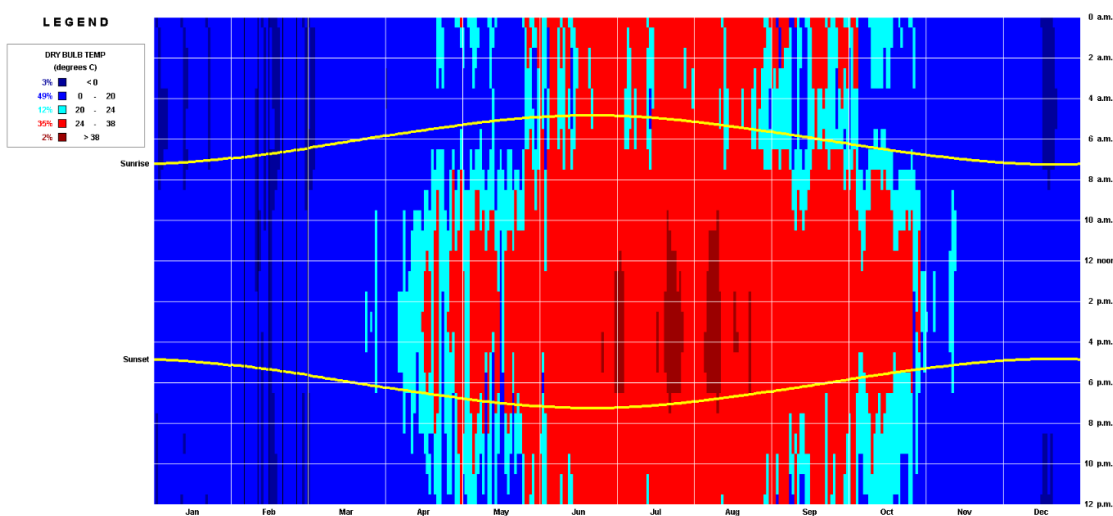


شکل ۱- تقسیمات اقلیمی ایران

شکل ۲ نمودار سایکرومتریک شهر تهران را براساس استاندارد ASHRAE 55 (ویرایش ۲۰۰۴) نشان می‌دهد که توسط نرم‌افزار مشاور اقلیمی^۱ تولید شده است. براساس این نمودار، در ۱۰/۸٪ از ساعات سال، شرایط آسایش حرارتی به‌طور طبیعی و بدون نیاز به راهکارهای طراحی خاص فراهم است. با این حال، در ۲۰/۴٪ از اوقات سال، استفاده از سایبان جهت ایجاد سایه‌اندازی برای دستیابی به آسایش حرارتی در فضای داخلی ضروری است.

این نتایج نشان می‌دهند که اقلیم تهران در بخشی از سال دارای شرایط آسایش حرارتی مطلوب به صورت طبیعی است، اما در بخش قابل توجهی از سال، نیاز به راهکارهای غیرفعال مانند استفاده از سایبان برای بهبود شرایط آسایش حرارتی وجود دارد. این موضوع بر اهمیت طراحی اقلیمی و استفاده از راهکارهای کاهش بار حرارتی در ساختمان‌ها در این منطقه تاکید می‌کند. به عبارت دیگر، معماران و طراحان ساختمان در تهران باید به‌طور خاص به

^۱ Climate Consulatnt

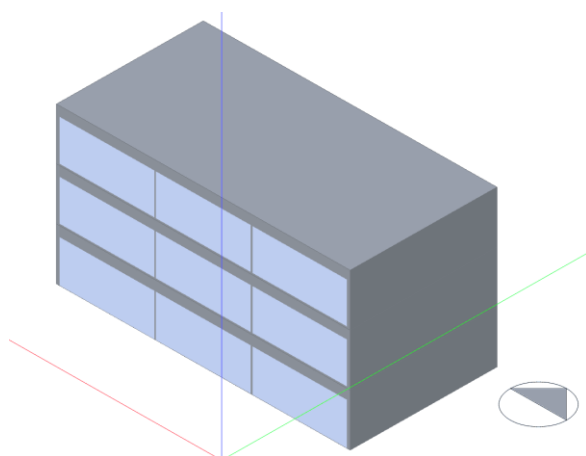


شکل ۴- متوسط دمای ماهانه شهر تهران

۲- روش تحقیق

شرقی و غربی، ابتدا یک ساختمان نمونه انتخاب شد. این ساختمان سه طبقه بوده و از نظر معماری دارای امتداد شرقی-غربی است که در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.

جهت تحلیل تأثیر لوورها بر مصرف انرژی ساختمان اداری کوتاه مرتبه و تعیین زاویه بهینه آن‌ها در جبهه‌های جنوبی،



شکل ۵- ساختمان شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر

ساختمان، ظرفیت اشغال و سایر مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

در ساختمان اداری مورد نظر شیشه‌ها ساده با ضخامت ۳ mm که ضریب انتقال حرارتی آن $5.829 W/m^2K$ می‌باشد. مصالح به‌کار رفته در ساختمان اداری مورد نظر در جدول ۲ ارائه شده است.

ساختمان اداری کم‌مرتبه مورد بررسی، با ابعاد ۱۰ متر در ۲۰ متر در نظر گرفته شد. میزان روشنایی این ساختمان اداری براساس استاندارد اشری^۱، ۴۰۰ لوکس تعیین شد. در شبیه‌سازی انجام‌شده، نقطه گرمایش ۲۲ درجه سلسیوس و نقطه سرمایش ۲۴ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد اشری در نظر گرفته شد. جزئیات مربوط به جهت‌گیری

^۱ ASHRAE

جدول ۱- مشخصات ساختمان مورد مطالعه

عنوان	مشخصات
نوع کاربری	ساختمان اداری چند طبقه
موقعیت	تهران، ایران
تعداد طبقات	۳
ارتفاع هر طبقه	۳٫۵ m
ظرفیت اشغال (نفر/m ²)	(استاندارد ASHRAE) ۷
ساعت کاری اداری	۸ PM تا ۸ AM
جهت‌گیری	شمال - جنوبی
روشنایی	۴۰۰ لوکس

جدول ۲- مشخصات مصالح ساختمان شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر براساس استاندارد اشری

لایه تشکیل دهنده	ضخامت لایه (mm)	^۲ U-value W/(m ² K)	^۱ R _c -value (m ² K)/W
دیوار بیرونی	آجرکار بیرونی ^۳	۱۰۰	۲٫۸۵
	عایق پلی استایرن اکس پی اس ^۴	۱۰۰	
	بلوک بتنی ^۵	۱۰۰	
	پلاستر گچ ^۶	۱۰	
دیوار داخلی	صفحه برد گچ ^۷	۲۰	۰٫۶۱
	هوا	۱۰	
	صفحه برد گچ	۲۰	
پشتیبان	آسفالت	۱۰	۲٫۰۹
	صفحه فیبر برد	۱۰	
	عایق پلی استایرن اکس پی اس ^۸	۴۰	
	بتن	۱۰	
سقف داخلی	پلاستر گچ	۱۵	۰٫۷۱
	فلورینگ اسکرید ^۹	۵۰	
	بتن	۱۵۰	
	عایق استاندارد	۳۰	
سقف	تایل سقف	۱۰	

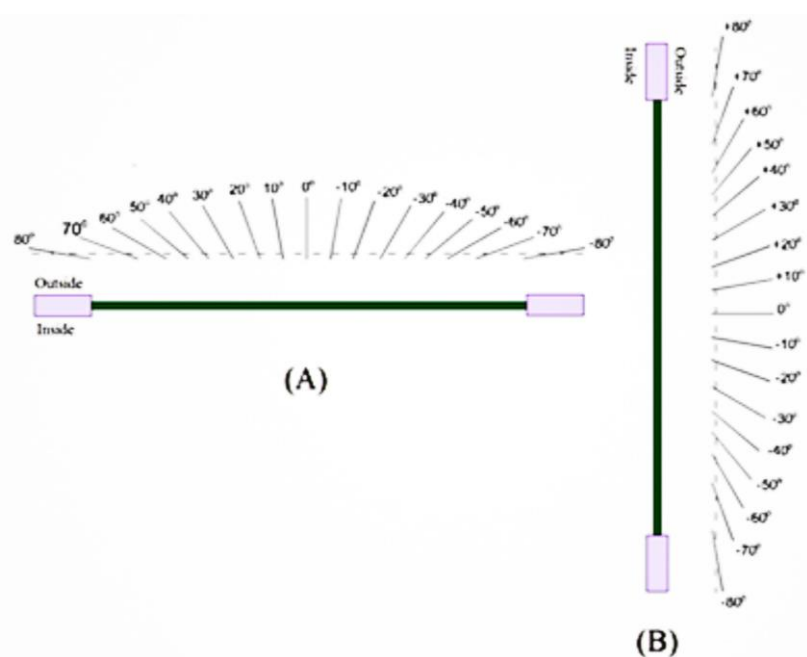
^۱ مقاومت حرارتی^۲ ضریب انتقال حرارت سطحی^۳ Brickwork Outer Leaf^۴ EPS Expanded Polystyrene^۵ Concrete Block^۶ Gypsum Plastering^۷ Gypsum plasterboard^۸ XPS Extruded Polystyrene^۹ Flooring screed

برای لوورها در سه جبهه جنوبی، شرقی و غربی در نظر گرفته شد. در جبهه جنوبی، از لوورهای افقی استفاده شد، در حالی که برای جبهه‌های شرقی و غربی، لوورهای عمودی به کار گرفته شدند. برای تعیین زاویه بهینه لوورها در جبهه جنوبی، پنجره‌های این جبهه به طور کامل (۱۰۰٪) باز در نظر گرفته شدند و هیچ بازشویی در سایر جبهه‌ها وجود نداشت. سپس، لوورها در ۱۷ زاویه مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند که این حالت در شکل ۶-B نمایش داده شده است. به منظور تعیین زاویه بهینه لوورها در جبهه شرقی، کل این جبهه به صورت شیشه‌ای در نظر گرفته شد و بازشوها در سایر جبهه‌ها صفر درصد بودند. در مورد جبهه غربی نیز، تمامی بازشوها در سایر جبهه‌ها صفر درصد در نظر گرفته شد و کل جبهه غربی به صورت شیشه‌ای تعریف گردید. لوورهای عمودی در جبهه‌های شرقی و غربی در ۱۷ زاویه مختلف مقایسه شدند که این حالت در شکل ۶-A نشان داده شده است. این بررسی‌ها به منظور دستیابی به بهترین زاویه لوورها برای بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان انجام شد.

در این مطالعه، به منظور شبیه‌سازی ساختمان، از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر استفاده شده است. این نرم‌افزار به دلیل دارا بودن موتور تحلیل انرژی پلاس^۱ مورد تأیید سازمان انرژی ایالات متحده آمریکا^۲ است و به عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه تحلیل انرژی ساختمان شناخته می‌شود. دیزاین‌بیلدر قابلیت محاسبه پارامترهای متعددی از جمله بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، مصرف انرژی مرتبط با سیستم‌های روشنایی و همچنین نیازهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان را دارا می‌باشد. در شکل ۵، نمای ساختمان شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر ارائه شده است. استفاده از این نرم‌افزار به دلیل دقت بالا و قابلیت‌های گسترده در تحلیل انرژی، امکان ارزیابی جامع و بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان را فراهم می‌کند.

۲-۱- حالت‌های شبیه‌سازی

برای ارزیابی تأثیر لوورها بر جذب انرژی خورشیدی، بارهای سرمایشی، گرمایشی و روشنایی و همچنین تعیین زاویه بهینه لوورها در ساختمان، ۱۷ حالت مختلف زاویه‌ای

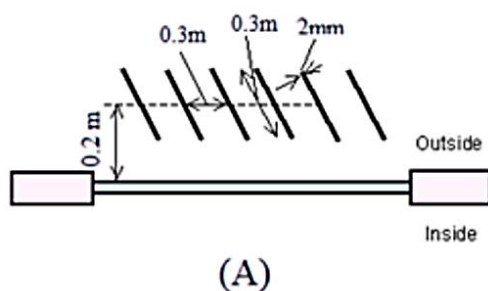


شکل ۶- سکشن پلانی پنجره با لوورهای عمودی در زوایای مختلف در جبهه شرق و غرب (A) و سکشن قائم از پنجره با لوورهای افقی در زوایای مختلف در جبهه جنوب (B)

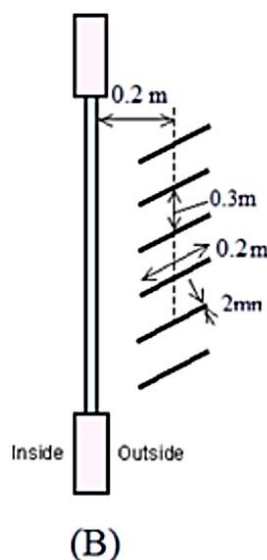
¹ EnergyPlus

² Department of Energy (DOE)

غربی، در تمامی حالت‌های شبیه‌سازی، ضخامت لوورها دو میلی‌متر و عرض آن‌ها ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در شکل ۷ حالت (A) نشان داده شده است. علاوه بر این، فاصله‌ی بین لوورهای عمودی در تمامی سناریوها ۳۰ سانتی‌متر تعیین شد که در شکل ۷ حالت (A) نمایش داده شده است. این پارامترها به منظور اطمینان از دقت و یکنواختی در تحلیل‌های انجام‌شده اعمال گردیدند.



در شکل ۷، مشخصات فنی شامل ضخامت، عرض و فاصله لوورهای افقی و عمودی به‌طور دقیق نمایش داده شده است. برای تعیین زاویه بهینه لوورها در ساختمان اداری، در تمامی سناریوهای شبیه‌سازی، ضخامت لوورهای افقی دو میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین، عرض این لوورها ۳۰ سانتی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز آن‌ها ۳۰ سانتی‌متر تعیین شد که در شکل ۷ حالت (B) قابل مشاهده است. در مورد لوورهای عمودی در جبهه‌های شرقی و



شکل ۷. برش پلانی پنجره با لوورهای عمودی با جزئیات در جبهه شرق و غرب (A) و برش قائم از پنجره با لوورهای افقی با جزئیات در جبهه جنوب (B)

سرمایش ساختمان ایفا می‌کند. این پدیده با تداوم تابش نور خورشید و یا وجود واسطه‌هایی که قادر به انتقال یا ممانعت از آن هستند، تشدید می‌شود. ضریب بهره خورشیدی^۲ پنجره، به عنوان شاخصی کلیدی، میزان انتقال انرژی خورشیدی از طریق کل پنجره، شامل شیشه و مواد تشکیل‌دهنده قاب را نشان می‌دهد [۲۱].

بررسی میزان بهره خورشیدی یک ساختمان اداری کوتاه مرتبه با استفاده از سایه‌بان (لوور) در زوایای مختلف در سه جهت جغرافیایی (جنوب، شرق و غرب) برای

۳- تحلیل داده‌ها و نتایج

بعد از شبیه‌سازی ساختمان مورد نظر با لوور با زوایای مختلف، میزان بهره خورشیدی، بار سرمایش، گرمایش و مصرف روشنایی ساختمان برای شهر تهران با اقلیم گرم و خشک محاسبه شد.

۳-۱- بهره خورشیدی

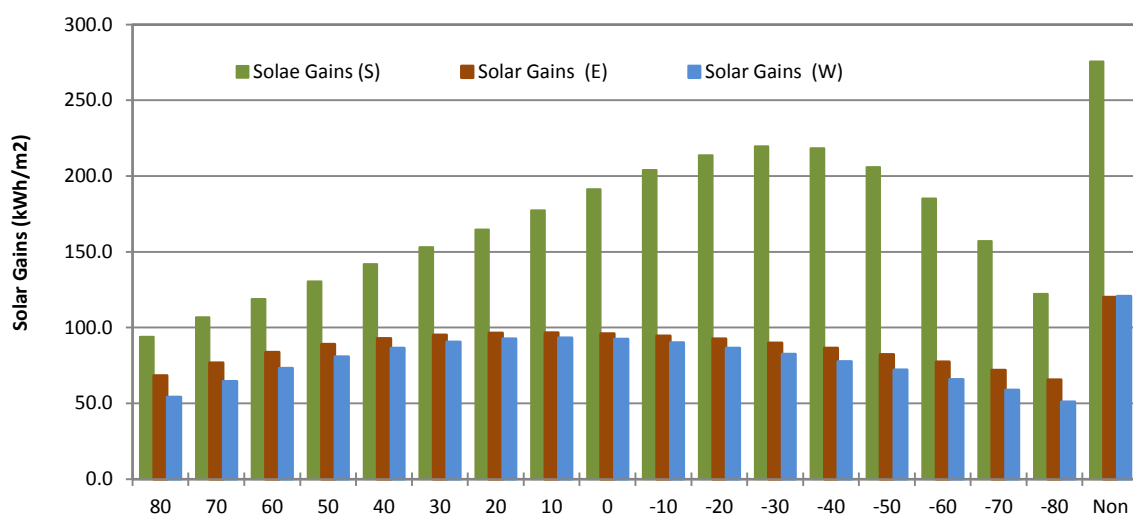
بهره خورشیدی^۱ که ناشی از افزایش دمای فضا، شیء یا ساختمان در اثر تابش خورشید است، نقش به‌سزایی در بار

^۱ Solar heat gain

^۲ Solar heat gains coefficient (SHGC)

جهت دارد. در نماهای شرقی و غربی شهر تهران، لوور با زاویه $+10^\circ$ درجه به ترتیب با میزان 96.7 kWh/m^2 و 93.3 kWh/m^2 ، بیشترین بهره خورشیدی را در بین زوایای مختلف به خود اختصاص داده است. کمترین میزان بهره خورشیدی نیز در هر دو نما متعلق به لوور با زاویه -80° درجه بوده و میزان آن در نماهای شرقی و غربی به ترتیب برابر با 56.6 kWh/m^2 و 51.2 kWh/m^2 است.

تهران در مقایسه با ساختمانی بدون لوور انجام شده است (شکل ۸). نتایج این بررسی در شهر تهران نشان می‌دهد که در نمای جنوبی، لوور با زاویه -30° درجه، بالاترین میزان بهره خورشیدی (219.3 kWh/m^2) را در بین حالت‌های مختلف دارا بوده و این میزان 2.3 درصد کمتر از ساختمان بدون لوور است. در مقابل، لوور با زاویه $+80^\circ$ درجه، کمترین میزان بهره خورشیدی (94 kWh/m^2) را در این



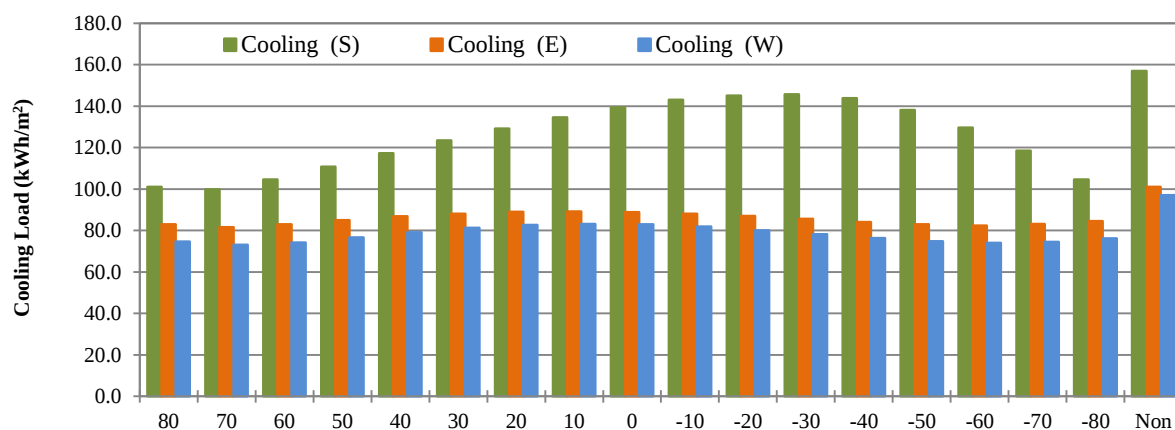
شکل ۸- میزان بهره خورشیدی سالانه ساختمان با زوایای مختلف لوور برای تهران

سرمایشی را با مقدار 99.92 kWh/m^2 همراه دارد. این تفاوت قابل توجه، بیانگر اهمیت انتخاب زاویه مناسب لوور در جبهه جنوبی به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی است. بررسی جبهه شرقی ساختمان نیز نشان می‌دهد که لوور با زاویه $+10^\circ$ درجه، با مصرف 89.22 kWh/m^2 بیشترین میزان بار سرمایشی را به خود اختصاص می‌دهد. در نقطه مقابل، لوور با زاویه $+70^\circ$ درجه، با مصرف 27.3 kWh/m^2 کمترین بار سرمایشی را در این جبهه ایجاد می‌کند. در نهایت، داده‌های مربوط به جبهه غربی نشان می‌دهد که لوور با زاویه $+10^\circ$ درجه، بیشترین میزان بار سرمایشی را با مقدار 83.22 kWh/m^2 دارد. در این جبهه نیز، لوور با زاویه $+70^\circ$ درجه، با مصرف 27.3 kWh/m^2 کمترین بار سرمایشی را به ارمغان می‌آورد.

۲-۳- بار سرمایش

این مطالعه با توجه به شکل ۹، به بررسی تاثیر زاویه‌ی لوورهای نصب شده بر سه جبهه اصلی (جنوب، شرق و غرب) ساختمان بر میزان بار سرمایشی مورد نیاز در شهر تهران پرداخته است. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که زاویه لوورها تاثیر قابل توجهی بر میزان بار سرمایشی ساختمان دارد و این تاثیر بسته به جهت جغرافیایی جبهه مورد نظر، متفاوت است.

در جبهه جنوبی، نتایج حاکی از آن است که استفاده از لوور با زاویه -30° درجه، منجر به بیشترین میزان مصرف بار سرمایشی به مقدار 145.27 kWh/m^2 می‌شود. در مقابل، لوور با زاویه $+70^\circ$ درجه کمترین میزان مصرف بار

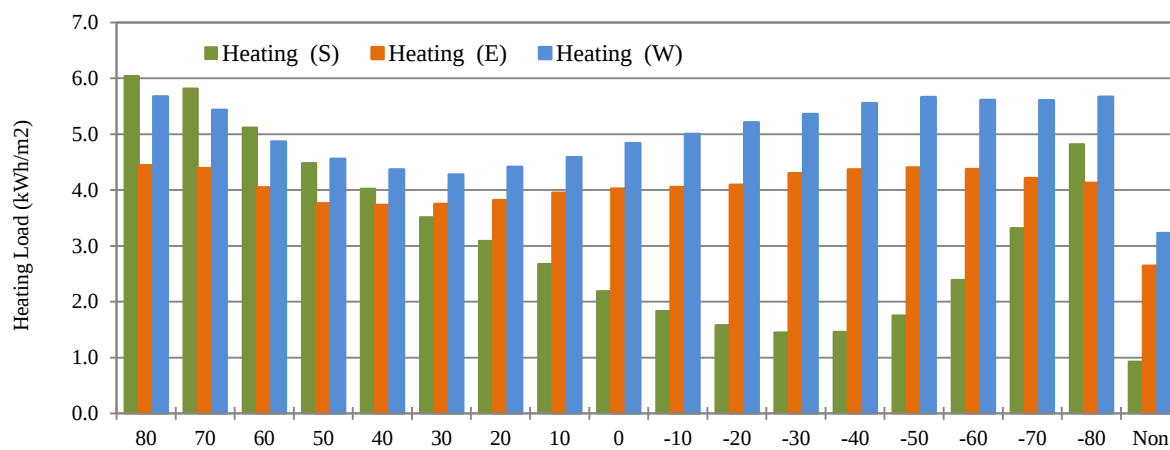


شکل ۹- میزان بار سرمایش سالانه ساختمان با زوایای مختلف لوور برای تهران

۳-۳- بار گرمایش

۸۰+، ۵۰- و ۸۰- درجه با 5.7 kWh/m^2 بیشترین بار گرمایشی را ایجاد می‌کنند. بر خلاف این، طبق شکل ۱۳، زاویه ۳۰+ درجه با 3.4 kWh/m^2 کمترین بار گرمایشی را در جبهه غربی دارد. تحلیل این داده‌ها نشان می‌دهد که زاویه لوور تاثیر قابل توجهی بر میزان بار گرمایشی ساختمان دارد و انتخاب زاویه مناسب می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کند. به نظر می‌رسد که در جبهه‌های شرقی و غربی، زوایای مثبت و منفی معینی باعث افزایش بار گرمایشی می‌شوند، در حالی که در جبهه جنوبی، زاویه منفی به کاهش بار گرمایشی کمک می‌کند. این تفاوت‌ها به دلیل زاویه تابش خورشید در ساعات مختلف روز و در فصول مختلف سال باشد.

براساس داده‌های ارائه شده در شکل ۱۰، نصب لوور در جبهه‌های جنوبی، شرقی و غربی ساختمان در تهران منجر به افزایش بار گرمایشی در مقایسه با حالت بدون لوور می‌شود. این پدیده ناشی از کاهش بهره خورشیدی مستقیم در ساختمان بدون لوور است که با شکل ۸ هم‌خوانی دارد. در جبهه جنوبی، لوور با زاویه ۸۰+ درجه بیشترین بار گرمایشی را ایجاد می‌کند. در جبهه شرقی، زوایای ۵۰- و ۸۰+ درجه با 4.4 kWh/m^2 بیشترین بار گرمایشی را دارند، در حالی که زوایای ۴۰+ درجه با 3.7 kWh/m^2 کمترین میزان را نشان می‌دهند. در جبهه غربی، زوایای



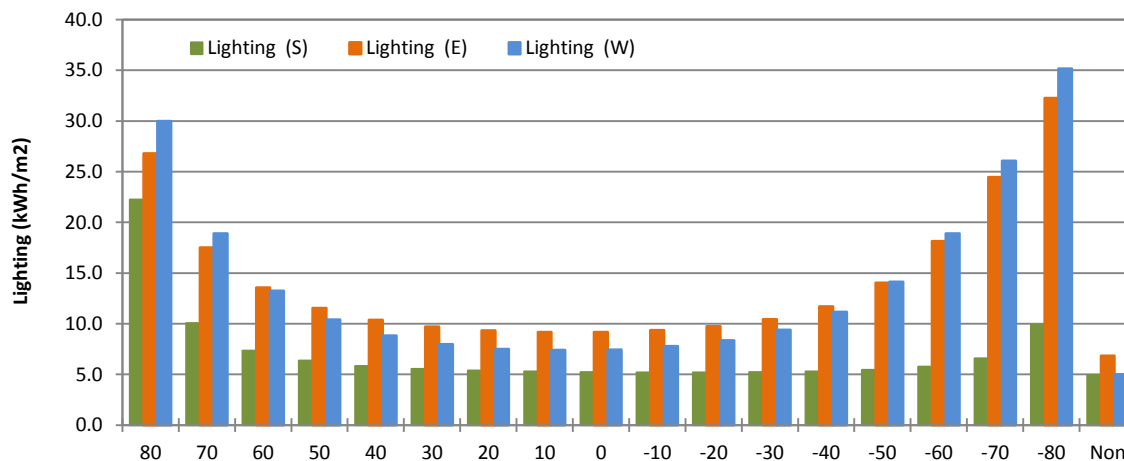
شکل ۱۰- میزان بار گرمایش سالانه ساختمان با زوایای مختلف لوور برای تهران

۳-۴- مصرف روشنایی

بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ نشان می دهد که استفاده از لوور با زوایای مختلف در تمامی جهات ساختمان، به طور کلی منجر به افزایش میزان مصرف انرژی روشنایی سالانه در مقایسه با ساختمان بدون لوور می گردد. این امر ناشی از ایجاد مانع توسط لوور در برابر تابش مستقیم خورشید و در نتیجه افزایش نیاز به استفاده از نور مصنوعی به منظور تامین روشنایی کافی در فضای داخلی ساختمان است. با این حال، این یافته بر اهمیت تعیین زاویه بهینه لوور متناسب با اقلیم و جهت جغرافیایی ساختمان تاکید می ورزد تا ضمن بهره مندی از مزایای سایه اندازی لوور در کاهش بار حرارتی ساختمان، کمترین میزان مصرف انرژی روشنایی حاصل شود.

براساس داده های ارائه شده برای تهران، بیشترین مصرف انرژی روشنایی در جبهه جنوبی ساختمان با استفاده

از لوور با زاویه $+80^\circ$ درجه و میزان $3/22 \text{ kWh/m}^2$ در سال مشاهده می شود. در جبهه های شرقی و غربی نیز، لوور با زاویه -80° درجه بیشترین میزان مصرف انرژی روشنایی را به ترتیب با مقادیر $3/32$ و $3/35 \text{ kWh/m}^2$ در سال به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر، کمترین میزان مصرف انرژی روشنایی در جبهه جنوبی ساختمان با زوایای صفر، -10° ، -20° و -30° درجه و به میزان $2/5 \text{ kWh/m}^2$ در سال حاصل شده است. در جبهه های شرقی و غربی نیز، زوایای صفر و $+10^\circ$ درجه کمترین مصرف انرژی روشنایی را به همراه داشته اند. به عنوان مثال، استفاده از لوور با زوایای صفر و $+10^\circ$ درجه در جبهه شرقی منجر به مصرف $2/9 \text{ kWh/m}^2$ و در جبهه غربی منجر به مصرف $2/7 \text{ kWh/m}^2$ انرژی شده است (شکل ۱۱). این اطلاعات نشان دهنده حساسیت عملکرد لوور به زاویه و جهت تابش خورشید و لزوم انجام تحلیل های دقیق برای بهینه سازی طراحی لوور در هر پروژه است.



شکل ۱۱- میزان روشنایی مصرفی سالانه ساختمان با زوایای مختلف لوور برای تهران

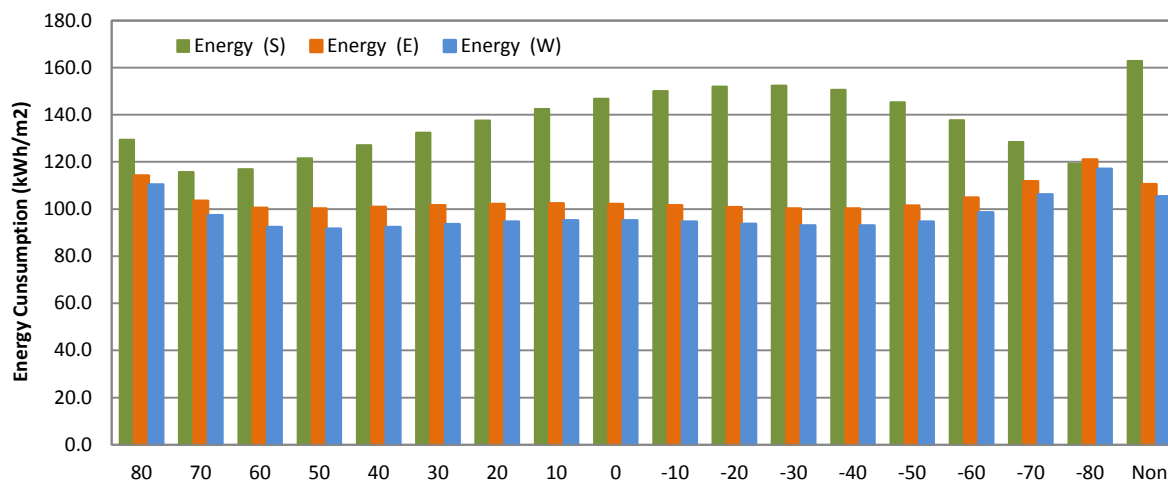
۳-۵- انرژی مصرفی

براساس نتایج حاصل از شبیه سازی (شکل ۱۲) استفاده از سیستم های سایه بان لوور با زوایای بهینه در نمای ساختمان های اداری شهر تهران، تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف انرژی کلی ساختمان دارد. به طور خاص، نصب

لوور با زاویه مثبت $+70^\circ$ درجه در جبهه جنوب ساختمان اداری کوتاه مرتبه به میزان $28/3\%$ صرفه جویی در مصرف انرژی را نسبت به ساختمان فاقد لوور نشان داده است. در نمای شرقی، لوور با زاویه منفی 40° درجه با مصرف $1/2 \text{ kWh/m}^2$ ، بهترین عملکرد را ارائه کرده و $9/4\%$

کاهش مصرف را محقق ساخته است. همچنین، استفاده از لوور با زاویه مثبت ۵۰ درجه در نمای غربی، با مصرف انرژی نسبت به حالت بدون لوور شده است.

کاهش مصرف را محقق ساخته است. همچنین، استفاده از لوور با زاویه مثبت ۵۰ درجه در نمای غربی، با مصرف انرژی نسبت به حالت بدون لوور شده است.



شکل ۱۲- میزان مجموع سرمایش و گرمایش و روشنایی سالانه ساختمان با زوایای مختلف لوور برای تهران

۴- نتیجه گیری

ساختمان بدون لوور است. در نمای شرقی، زاویه ۴۰- با $100/22 \text{ kWh/m}^2$ (۹/۴) درصد کاهش نسبت به حالت بدون لوور) و در نمای غربی، زاویه ۵۰+ با $91/26 \text{ kWh/m}^2$ (۱۳) درصد کاهش نسبت به حالت بدون لوور) به عنوان بهینه ترین زوایا برای کاهش مصرف انرژی شناسایی شدند. نتایج این پژوهش دارای اثرات قابل توجهی در زمینه طراحی ساختمان های پایدار و بهینه سازی مصرف انرژی در مناطق با اقلیم گرم و خشک است. با بهره گیری از زوایای بهینه لوور، معماران و مهندسان می توانند میزان بهره خورشیدی را کنترل کرده و در نتیجه، بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان را کاهش دهند. این امر منجر به کاهش قابل توجه مصرف انرژی، کاهش هزینه های مرتبط با انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای خواهد شد. علاوه بر این، نتایج این تحقیق می تواند به عنوان راهنمایی برای تدوین استانداردهای ساختمانی و مقررات ملی ساختمان در راستای افزایش بهره وری انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی ساختمان ها مورد استفاده قرار گیرد. کاربرد عملی این یافته ها در طراحی ساختمان های جدید و بازسازی ساختمان های موجود، می تواند به ایجاد شهرهای پایدارتر و کاهش

در این پژوهش، بهینه سازی بهره وری خورشیدی و کاهش انرژی مصرفی (شامل سرمایش، گرمایش و روشنایی) در ساختمان های اداری شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از نرم افزار تخصصی دیزاین بیلدر به منظور شبیه سازی عملکرد انرژی ساختمان در شرایط مختلف اقلیمی استفاده شد.

نتایج شبیه سازی ها نشان داد که در نمای جنوبی ساختمان های اداری واقع در اقلیم گرم و خشک تهران، لوور با زاویه منفی ۳۰ درجه بیش ترین میزان بهره خورشیدی $219/27 \text{ kWh/m}^2$ را دارا است که ۲۰/۳ درصد کمتر از ساختمان بدون لوور است. زاویه ۸۰+ کم ترین بهره خورشیدی را در این نما ارائه می دهد. در نماهای شرقی و غربی، زاویه ۱۰+ به ترتیب با $96/77$ و $93/23 \text{ kWh/m}^2$ بیش ترین بهره خورشیدی را نشان داد، در حالی که زاویه ۸۰- کم ترین میزان را دارا بود.

از منظر مصرف انرژی، استفاده از لوور با زاویه ۷۰+ در نمای جنوبی منجر به کم ترین میزان مصرف انرژی $115/28 \text{ kWh/m}^2$ شده است که ۲۸/۲۹ درصد کمتر از

- وابستگی به منابع انرژی فسیلی کمک کند.
- پیشنهاد می‌گردد مطالعات آتی می‌توانند به بررسی تأثیر هم‌زمان تغییر زوایای لوور در نماهای مختلف ساختمان بر میزان بهره‌خوردگی و مصرف انرژی بپردازند. همچنین، ارزیابی عملکرد این سیستم‌ها در سایر اقلیم‌های ایران و با در نظر گرفتن انواع مختلف کاربری‌های ساختمانی (مسکونی، تجاری و غیره) می‌تواند به توسعه راهکارهای جامع‌تر و بهینه‌تر برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها منجر شود. علاوه بر این، بررسی اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از به‌کارگیری این سیستم‌ها نیز می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های کلان در حوزه ساخت و ساز پایدار مفید واقع شود.
- مراجع
- [6] S. Grynning, B. Time, and B. Matusiak, 'Solar shading control strategies in cold climates – Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces', *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 182–194, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.06.007.
 - [7] L. Karlsen, P. Heiselberg, I. Bryn, and H. Johra, 'Solar shading control strategy for office buildings in cold climate', *Energy Build.*, vol. 118, pp. 316–328, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.014.
 - [8] A. I. Palmero-Marrero and A. C. Oliveira, 'Effect of louver shading devices on building energy requirements', *Appl. Energy*, vol. 87, no. 6, pp. 2040–2049, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.11.020.
 - [9] B. R. Hughes and S. A. A. Ghani, 'A numerical investigation into the effect of Windvent louvre external angle on passive stack ventilation performance', *Build. Environ.*, vol. 45, no. 4, pp. 1025–1036, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.10.010.
 - [10] A. Adam, O. D. Paul, D. O. Michael, A. O. Donovan, P. D. O. Sullivan, and M. D. Murphy, 'A field study of thermal comfort performance for a slotted louvre ventilation system in a low energy retrofit', *Energy Build.*, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.049.
 - [11] F. Hammad and B. Abu-Hijleh, 'The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building', *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1888–1895, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.024.
 - [12] K. Konis and E. S. Lee, 'Measured daylighting potential of a static optical louver system under real sun and sky conditions', *Build. Environ.*, vol. 92, pp. 347–359, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.024.
 - [13] A. A. Freewan, L. Shao, and S. Riffat, 'Interactions between louvers and ceiling geometry for maximum daylighting performance', *Renew. Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 223–232, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.03.019.
 - [1] N. F, 'Office buildings energy efficient: energy efficiency with the architectural design', *Berlin Univ.*, 2015.
 - [2] C. G. Granqvist, 'Electrochromics and Thermochromics: Towards a New Paradigm for Energy Efficient Buildings', *Mater. Today Proc.*, vol. 3, pp. S2–S11, 2016, doi: 10.1016/j.matpr.2016.01.002.
 - [3] A. Piccolo and F. Simone, 'Effect of switchable glazing on discomfort glare from windows', *Build. Environ.*, vol. 44, no. 6, pp. 1171–1180, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.08.013.
 - [4] A. A. Y. Freewan, 'Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions', *Sol. Energy*, vol. 102, pp. 14–30, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.01.009.
 - [5] M. V. Nielsen, S. Svendsen, and L. B. Jensen, 'Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight', *Sol. Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 757–768, May 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.01.010.

- [14] A. Borowczynski, D. Heim, and E. Szczepanska-Rosiak, 'Application of sky digital images for controlling of louver system', *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1769–1774, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.301.
- [15] G. Kim, H. S. Lim, T. S. Lim, L. Schaefer, and J. T. Kim, 'Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings', *Energy Build.*, vol. 46, pp. 105–111, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.040.
- [16] D. Park, P. Kim, J. Alvarenga, K. Jin, J. Aizenberg, and M. Bechthold, 'Dynamic daylight control system implementing thin cast arrays of polydimethylsiloxane-based millimeter-scale transparent louvers', *Build. Environ.*, vol. 82, pp. 87–96, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.07.016.
- [17] A. Hashemi, 'Daylighting and solar shading performances of an innovative automated reflective louvre system', *Energy Build.*, vol. 82, pp. 607–620, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.086.
- [18] E. Taveres-cachat, K. Boe, G. Lobaccaro, F. Goia, and S. Grynning, 'Integration of renewable energy in the built environment (electricity, heating and cooling)', *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 607–612, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.357.
- [19] N. A. Ahmed and K. Wongpanyathaworn, 'Optimising Louver Location to Improve Indoor Thermal Comfort based on Natural Ventilation', *Procedia Eng.*, vol. 49, pp. 169–178, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.10.125.
- [20] A. Paul and D. O. S. Maria, 'A field study of wind dominant single sided ventilation through a narrow slotted architectural louvre system', *Energy Build.*, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.025.
- [21] T. Baenas and M. Machado, 'On the analytical calculation of the solar heat gain coefficient of a BIPV module', *Energy Build.*, vol. 151, pp. 146–156, 2017.