ISSN: 2538-3019, EISSN: 2676-4806
DOI: 10.30479/AT.2023.17061.1875
دوفصلنامهٔ اندیشهٔ معماری، نشریهٔ علمی، سال هفتم، شمارهٔ سیزدهم، بهار و تابستان ۱۴۰۲، صص ۱۹۲-۲۱۱

ارزیابی تأثیر شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقه، بر عملکرد نور روز ساختمان‌های بلند اداری شهر تهران

علی جابری*[۱]، افرا غریب‌پور[۲]

تاریخ دریافت مقاله : ۱۴۰۱/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

چکیده

بیان مساله: استفاده بهینه از نور روز به عنوان یکی از عوامل اصلی مؤثر در ارتقا کیفیت فضاهای اداری، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی الکتریکی، بهبود عملکرد و سلامت کارکنان دارد. در طراحی ساختمان‌های بلندمرتبه، مؤلفه‌های متعددی بر میزان نور طبیعی در فضای داخلی تأثیر می‌گذارند. با اتخاذ تدابیری نظیر بهینه‌سازی شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقات در مراحل آغازین طراحی، می‌توان ضمن بهره‌مندی از مزایای استفاده از نور طبیعی، از تعارضات آتی میان مؤلفه‌های مختلف طراحی جهت بهینه‌سازی روشنایی طبیعی ساختمان جلوگیری نمود. اهمیت این موضوع در طراحی ساختمان‌های بلند اداری باتوجه به اهمیت نور طبیعی، مقیاس و همبستگی مؤلفه‌های طراحی، بیشتر به چشم می‌آید.

سوال تحقیق: ارتباط میان شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقات ساختمان‌های بلند اداری، با شاخص کفایت فضایی نور روز (sDA)، به‌عنوان معیاری برای سنجش میزان روشنایی طبیعی در فضای داخلی چگونه است؟

اهداف تحقیق: این پژوهش پس از ارزیابی میزان حساسیت شاخص sDA به هریک از متغیرها، شکل هندسی و جهت‌گیری بهینه پلان و حداقل ارتفاع طبقه متناسب با مساحت کل طبقه را در ساختمان‌های بلند اداری جهت دستیابی به حداکثر امتیاز استاندارد روشنایی لید (LEED)، در اقلیم شهر تهران، تعیین می‌کند.

روش تحقیق: فرایند کلی این پژوهش از سه مرحله شامل؛ جمع‌آوری و تحلیل داده‌های حاصل از مطالعهٔ ۱۰۰ ساختمان بلند اداری برای تعیین بازه مجاز بهینه‌یابی و مدل پایه، شبیه‌سازی نور روز به روش «مدل‌سازی روشنایی طبیعی مبتنی بر اقلیم» با نرم‌افزار رادیانس، مقایسه نتایج شبیه‌سازی و بهینه‌یابی هریک از متغیرها، تشکیل‌یافته است.

مهم‌ترین یافته‌ها و نتیجه‌گیری تحقیق: بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر مربوط به شاخص ($sDA_{300/50\%}$) در فضاهای اداری با تغییر جهت‌گیری پلان،۱ تا ۴/۵٪ نسبت به مدل پایه، ارتقا یافته است. مؤثرترین شکل هندسی از میان الگوهای هندسی طراحی پلان ساختمان‌های بلند اداری برای بهبود شاخص مذکور، مثلث متساوی‌الاضلاع و پس از آن بیضی، مستطیل، مربع و دایره می‌باشد. شاخص sDA با تعیین شکل هندسی مناسب پلان، تا بیش از ۱۰٪ بهبود یافته است. ارتفاع پیشنهادی کف تا سقف طبقه باهدف دستیابی به حداکثر امتیاز استاندارد روشنایی (LEED v4.1)، برای اشکال هندسی موردمطالعه، در بازهٔ مساحتی ۱۵۰۰ مترمربع و کمتر، ۲۷۰ سانتی‌متر، ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ مترمربع، ۲۷۰ تا ۳۱۰ سانتی‌متر و بازهٔ ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ مترمربع، ۳۱۰ تا ۳۴۰ سانتی‌متر، است. نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمایی اجرایی در مراحل آغازین طراحی برای ارتقا سطح آسایش کاربران ساختمان‌های بلند اداری در شهر تهران باشد.

کلمات کلیدی: تناسبات هندسی، بهینه‌سازی پارامتریک، ساختمان بلند اداری، شبیه‌سازی رایانه‌ای، نور روز، مراحل آغازین طراحی

[۱]* کارشناسی ارشد فناوری معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، (نویسنده مسئول)، ایمیل: ali.jaberi@ut.ac.ir
[۲] استادیار دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایمیل: afra.gharibpour@ut.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش شهرنشینی و تراکم جمعیت در کلان‌شهرهایی چون تهران و متعاقباً افزایش تقاضا و قیمت زمین، منجر به ایجاد رویکردی به‌سوی بلندمرتبه‌سازی طی سالیان اخیر جهت گنجاندن جمعیت متمرکز شهری گردیده است (Ali asghar Pilehvar 2021). بررسی آماری ساختمان‌های بلند تا سال ۲۰۱۹ میلادی بر اساس نوع کاربری نشان می‌دهد که ۶۲/۷٪ از ساختمان‌هایی با ارتفاع بیش از ۲۰۰ متر، به کاربری اداری اختصاص یافته‌اند (de Best 2019). تامین آسایش بصری در فضاهای اداری به سبب فعالیت‌های متنوع و طولانی بودن مدت زمان حضور کاربران در این گونه فضاها اهمیت بیشتری در میان انواع فضاهای معماری داشته و دشوارتر است. از این رو ۴۴٪ از پژوهش‌های بهینه‌سازی عملکرد ساختمان به دلیل اهمیت بازدهی کاربران، مصرف انرژی و تاثیر محیط بر رفتار و سلامت کارکنان، در کاربری اداری انجام شده و بیشترین سهم را از میان کاربری‌های مختلف در مطالعات این حوزه به خود اختصاص داده است (Kheiri 2018).

استفاده بهینه از نور روز در فضای داخلی ساختمان‌های اداری، از عوامل اصلی در ارتقاء سطح اسایش کاربر به شمار می‌رود. بهره‌گیری از نور طبیعی در محیط داخلی تا حدود زیادی بر روحیات، رفتار، بازدهی و کارایی افراد تأثیر گذار است (پوردیهیمی و حاجی سید جوادی ۱۳۸۷). نور روز با بهبود عملکرد سیستم بصری، تنظیم ریتم سیرکادین بدن و بهبود عملکرد اداراکی مغز، منجر به ارتقاء عملکرد کارکنان در محیط اداری می‌گردد. استفاده از این منبع نور محیطی سالم‌تر و پویاتر نسبت به منابع نوری مصنوعی فراهم می‌آورد و می‌تواند منجر به ارتقاء بازدهی کارکنان تا بیش از ۴/۵٪ گردد. نور روز افزون بر این که به‌عنوان یکی از بهترین منابع نوری، باعث نمایش بهتر رنگ‌ها در فضا می‌گردد، کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی الکتریکی را نیز به دنبال دارد (Edwards and Torcellini 2002). مطالعات نشان می‌دهند، استفاده بهینه از روشنایی طبیعی می‌تواند منجر به کاهش۵۰ تا ۸۰٪ نیاز به روشنایی مصنوعی در ساختمان های اداری گردد. با این حال، با وجود این که غالب زمان فعالیت ساختمان‌های اداری در طول روز انجام می‌گیرد، ۳۷٪ انرژی الکتریکی مصرفی در این ساختمان‌ها صرف روشنایی مصنوعی می‌گردد (نصراللهی ۱۳۹۰).

بر اساس نتایج مطالعات پیشین، سیاست‌گذاری کلی در فاز اولیهٔ طراحی ساختمان‌های بلندمرتبه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد ساختمان در بهره‌مندی از روشنایی طبیعی در محیط‌های داخلی و کاهش مصرف انرژی، ضمن صرف کمترین هزینه دارد. این در حالی است که شبیه‌سازی و بهینه‌سازی «عملکرد نور روز[۱]» غالباً در مراحل انتهایی و پس از اتخاذ تصمیمات کلان طراحی انجام می‌گیرد (زمردیان، حدادزادگان، تحصیلدوست ۲۰۲۱). از این رو با توجه به رشد بلندمرتبه سازی در کلان شهر تهران و لزوم اتخاذ تدابیری جهت کاهش مصرف انرژی و بهره‌مندی از مزایای نور طبیعی در محیط‌های اداری، ارائه دستورالعمل‌هایی کاربردی جهت ارتقاء عملکرد ساختمان در بهره‌مندی از روشنایی طبیعی در مراحل آغازین ضروری می‌نماید.

عوامل متعددی کمیت و کیفیت نور روز در فضای داخلی را تعیین می‌کنند که به‌طورکلی می‌توان آن‌ها را در دو دسته عوامل محیطی و عوامل طراحی جای داد. شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری ساختمان نسبت به راستای جنوب، ارتفاع کف تا سقف طبقه، نسبت پنجره به دیوارهای خارجی «WWR[۲]»، تناسبات پنجره، ضریب عبور نور شیشه «VT[۳]»، ضریب بازتاب مصالح، مبلمان‌ها و سطوح، مهم‌ترین متغیرهای طراحی مؤثر بر روشنایی طبیعی در فضای داخلی، هستند (Dubois and Blomsterberg 2011).

تغییرات اساسی طراحی در مراحل پایانی به دلیل پیوستگی شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقات با سایر مؤلفه‌ها نظیر سازه، عملکرد، سیستم‌های دسترسی عمودی، بازدهی اقتصادی و زیبایی‌شناسی فرم، به ندرت به عنوان روشی کاربردی در ارتقا عملکرد نور روز ساختمان‌های بلند پیشنهاد می‌گردد. ازاین‌رو تصمیم در مورد این متغیرها باید در مراحل آغازین طراحی جهت کاهش تعارضات آتی با سایر

مؤلفه‌ها، صرفه‌جویی در زمان و هزینه صورت گیرد. با این‌حال، غالب مطالعات این حوزه ارتباط میان نسبت پنجره به دیوارهای خارجی (WWR)، تناسبات پنجره و ضریب عبور نور شیشه (VT) را که تغییر آن‌ها در فرایند طراحی زمان و هزینهٔ چندانی را صرف نمی‌کند، بررسی و ارزیابی نموده‌اند. بهینه‌یابی شکل هندسی و تناسبات پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقات با هدف ارتقا عملکرد نور روز بدون در نظر گرفتن تأثیر آن بر عملکرد، سازه، بازدهی اقتصادی، زیبایی‌شناسی فرم و سیستم‌های دسترسی عمودی منجر به تک‌بعدی بودن نتایج و کاهش اعتبار آن می‌گردد. این پژوهش با مطالعه و جمع‌آوری اطلاعات ۱۰۰ ساختمان بلند اداری، پس از تعیین الگوهای کیفی و کمی طراحی، هریک از متغیرها را در بازه‌های حاصل از الگوهای تعیین شده بهینه‌یابی و ارزیابی می‌نماید. ازاین‌رو نتایج بهینه‌یابی انطباق بیشتری با سایر عوامل مؤثر در طراحی نشان می‌دهند.

این مقاله ارتباط میان شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقات ساختمان‌های بلند اداری را با شاخص کفایت فضایی نور روز «sDA[۴]» به عنوان نزدیک‌ترین شاخص ارزیابی نور روز با ادراک انسان در اقلیم شهر تهران تعیین و چارچوبی جهت پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد نور روز در مراحل آغازین طراحی برای طراحان و برنامه‌ریزان فراهم می‌آورد.

۲- پرسش‌های تحقیق

این پژوهش در پی یافتن پاسخ این سؤالات انجام گرفته است:

- ارتباط میان شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت-گیری و ارتفاع طبقه، با شاخص sDA به‌عنوان معیاری جهت سنجش میزان روشنایی در فضای داخلی، در ساختمان‌های بلند اداری در شهر تهران چگونه است؟
- شکل هندسی بهینهٔ پلان برای ساختمان‌های بلند اداری در شهر تهران از میان اشکال هندسی پلان متداول برای این ساختمان‌ها کدام است؟
- ارتفاع بهینه نسبت به مساحت طبقه در هریک از اشکال هندسی موردمطالعه در شهر تهران چگونه است؟
- تغییر جهت‌گیری ساختمان نسبت به راستای جنوب در هریک از اشکال هندسی پلان مورد مطالعه تا چه اندازه منجر به بهبود شاخص sDA می‌گردد؟
- الگوهای هندسی متداول طراحی ساختمان‌های بلند اداری کدام‌اند؟

۳- فرضیه تحقیق

- با توجه به مطالعات پیشین به نظر می‌رسد تغییر شکل هندسی پلان منجر به بهبود قابل‌توجهی در شاخص sDA گردد.
- به نظر می‌رسد تغییر در جهت‌گیری ساختمان با توجه به فرض مدل پایه ساختمان بلند با دیوار پرده‌ای و نسبت بازشو به جداره‌ی یکسان در تمامی جبه‌ها، از تأثیر کمتری نسبت به دو مؤلفه دیگر بر شاخص sDA برخوردار باشد.

۴- پیشینه تحقیق

تأمین شرایط آسایش کاربر در محیط داخلی، از اهداف اصلی در طراحی ساختمان‌ها، به شمار می‌آید. آسایش بصری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تأمین آسایش کاربر در فضا، تأمین شرایط مناسب برای بینایی و جلوگیری از خستگی چشم ناشی از انطباق‌های متوالی است و به بینایی و ادراک فرد، میزان روشنایی، شکل فضا و تطابق آن با فعالیت‌های مختلف کاربران بستگی دارد (Al horr et al. 2016).

تأثیر بهینه‌سازی متغیرهای معماری در مراحل آغازین طراحی ساختمان‌های بلند بر عملکرد نور روز در پژوهش‌های متعددی بررسی و ارزیابی گردیده است. نتایج این مطالعات تاثیر قابل توجه بهینه‌سازی این متغیرها را در بهبود عملکرد نور روز ساختمان نشان می-دهند(X. Chen, Yang, and Wang 2017) . بخشی از این مطالعات به بررسی متغیرهای مرتبط با فرم ساختمان (Mahdavinejad, Ghasempourabadi, and Ghaedi 2012; Liu, Lin, and Peng 2020) بخشی به بررسی نسبت پنجره به جداره های خارجی (WWR) (Alghoul, Rijabo, and Mashena 2017; Marino, Nucara, and Pietrafesa 2017)، جهت-گیری ساختمان (Abanda and Byers 2016) و بخشی نیز به مطالعه ارتباط ضریب بازتاب و ضریب عبور

نور شیشه (VT) با میزان روشنایی طبیعی در محیط داخلی می‌پردازند (Mehdi Ghiai et al. 2014).

کو و همکاران به در مقاله‌ای به بررسی روشی جهت پیش‌بینی و ارزیابی عملکرد نور روز در ساختمان‌های بلند اداری از طریق شاخص «DF[5]» و «استاندارد روشنایی لید[6]» پرداخته‌اند. این مطالعه هندسه پلان، عمق ساختمان (فاصله میان جداره خارجی تا هسته)، مدول پلان، ارتفاع طبقه، نسبت پنجره به جداره (WWR) و ضریب عبور نور شیشه (VT) را به عنوان مؤلفه‌های طراحی مؤثر بر روشنایی محیط داخلی تعیین می‌نماید. با توجه به فراوانی هندسه پلان مربع به عنوان فراوان‌ترین الگوی هندسی پلان ساختمان‌های بلند اداری، ۴ مدل پایه با هندسه پلان مربع، در چهار عرض جغرافیایی و با چهار عمق مفید مختلف (استخراج شده از مطالعه ساختمان‌های بلند ساخته شده) با فرض ثابت در نظر گرفتن سایر متغیرها ایجاد می‌کند. دو متغیر مورد مطالعه در این پژوهش یکی ضریب مؤثر بازشو (برآیند نسبت مساحت پنجره به جداره خارجی و ضریب عبور نور شیشه) و عمق مفید ساختمان هستند. نتایج نشان می‌دهد که از طریق رابطه میان این دو می‌توان عملکرد نور روز در ساختمان‌هایی مشابه را در مراحل آغازین طراحی پیش‌بینی نمود (Ko, Elnimeiri, and Clark 2008).

لی و بوبکری در مقاله‌ای رابطه میان مؤلفه‌های طراحی و شاخص‌های ارزیابی نور روز را بررسی می‌کنند. این تحقیق مؤلفه‌های طراحی مؤثر بر شاخص‌های سنجش نور روز را بر اساس میزان تأثیر هریک ارزیابی و رتبه‌بندی می‌نماید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نسبت پنجره به مساحت طبقه «WFR[7]» و نسبت پنجره به حجم طبقه «WVR[8]» از نسبت مساحت پنجره به جداره (WWR) از همبستگی بیشتری با شاخص‌های اندازه‌گیری نور طبیعی در محیط داخلی برخوردار است (J. Lee, Boubekri, and Liang 2019).

راجی و همکاران با مطالعه تاثیر شکل و تناسبات هندسی و عمق پلان، جهت‌گیری ساختمان و نسبت میزان پنجره به دیوار (WWR) بر میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های بلند در سه شهر با شرایط اقلیمی مختلف، نشان می‌دهند که بهینه‌سازی مؤلفه‌های معین شده در مراحل آغازین طراحی ساختمان‌های بلندمرتبه، می‌تواند تا ۳۲٪ منجر به کاهش مصرف انرژی در ساختمان گردد (Raji, Tenpierik, and Van den Dobbelsteen 2017). اورقی و همکاران نیز بیان می‌کنند که همبستگی زیادی میان شکل هندسی پلان و میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های بلند اداری وجود دارد (Ourghi, Al-Anzi, and Krarti 2007).

پژوهش‌های پیشین در زمینهٔ بهینه‌سازی ساختمان‌های بلندمرتبه اداری، با رویکرد دستیابی به نور طبیعی کافی عمدتاً به روش «شاخص‌های استاتیک نور روز[9]» انجام‌گرفته است (K. S. Lee, Han, and Lee 2016). هندسه‌ی بهینه پلان و جهت‌گیری آن و همچنین ارتفاع بهینهٔ کف تا سقف طبقات، متغیرهایی هستند که دست‌یابی به نسبت بهینهٔ آن‌ها از جنبه کیفی و کمی، بدون در نظر گرفتن زاویه تابش خورشید در طول ساعات و فصول مختلف سال، منجر به کاربردی نبودن نتایج در شرایط اجرایی می‌گردد. همچنین علیرغم مطالعات انجام شده در این زمینه، در فرآیند بهینه‌سازی عملکرد و روشنایی طبیعی ساختمان‌های بلند از طریق متغیرهای معماری، تاثیر آن بر سازه، بازدهی اقتصادی، عملکرد و زیبایی‌شناسی باتوجه به پیچیدگی آن، به خوبی در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این‌ها، تحقیقات متعدد دیگر در این حوزه نشان‌می‌دهند که تأثیر متغیرهای مختلف معماری بر عملکرد ساختمان در بهره‌مندی از روشنایی طبیعی در محیط داخلی، متناسب با نوع کاربری ساختمان و اقلیم، متفاوت است.

برای نمونه، مطالعهٔ انجام شده توسط گارسیا از طریق شبیه‌سازی پارامتریک تأثیر متغیرهای درصد پنجره، فرم، جهت‌گیری و نوع شیشه در کاربری اداری در چهار منطقه آب‌وهوایی در اسپانیا بر میزان روشنایی

فضای داخلی و مصرف انرژی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی فرم در اقلیم‌های مختلف تأثیر متفاوتی بر میزان روشنایی محیط داخلی می‌گذارد که در بیشترین حالت منجر به بهبود بر میزان روشنایی محیط تا ۶۰٪ می‌گردد (García 2016).

در مطالعهٔ مشابه دیگری، فنگ به روش بهینه‌سازی پارامتریک در سه اقلیم مختلف دیگر نشان می‌دهد که می‌توان بهره‌مندی از نور روز را در اقلیم گرم تا حدود ۱۶٪ افزایش داد (Fang 2017). این تحقیقات و سایر پژوهش‌های مشابه، متناسب با موضوع و اهداف پژوهش، هریک به بررسی متغیرها، اقلیم‌ها و کاربری‌های خاصی به‌گونه‌ای که ممکن است در مورد سایر مطالعات کاربردی نداشته باشد پرداخته‌اند.

همچنین، همانطور که اشاره گردید، تصمیم در مورد متغیرهای معماری موثر بر میزان روشنایی در فضای داخلی در ساختمان‌های بلندمرتبه در مراحل ابتدایی طراحی، علاوه بر کاهش تعارضات آتی میان سایر اجزا، منجر به افزایش سرعت طراحی و کاهش هزینه‌ها می‌گردد (Kahsay, Bitsuamlak, and Tariku 2021). با این‌وجود دستورالعمل‌های چندانی در مراحل آغازین طراحی جهت ارزیابی تأثیر مؤلفه‌های هندسی مختلف بر عملکرد نور روز در فضای داخلی از طریق شاخص‌های پویا و طراحی بهینهٔ ساختمان بر این اساس وجود ندارد (Krarti, Erickson, and Hillman 2005).

بنابراین، از آن جایی که عمده مطالعات در این حوزه، تأثیر ابعاد و تناسبات پنجره، مشخصات شیشه، جهت پنجره و نسبت مساحت آن به مساحت دیوارهای خارجی (WWR) را مورد ارزیابی و بهینه‌سازی قرار داده‌اند و به تأثیر اصلی‌ترین مؤلفه‌های کالبدی مؤثر بر عملکرد نور روز در ساختمان‌های بلند، شامل شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقات، توجه چندانی نشده است و همچنین متفاوت بودن نتایج در اقلیم‌های مختلف، این پژوهش به بررسی ارتباط میان سه متغیر تعیین شده با شاخص sDA در شهر تهران می‌پردازد.

۵- روش تحقیق

تحلیل «پارامتریک[۱۰]» (تحلیل مستقل متغیرها) و «الگوریتم ژنتیک[۱۱]» (تحلیل هم‌زمان متغیرها)، دو رویکرد اصلی جهت بهینه‌سازی ساختمان با هدف ارتقا عملکرد نور روز به شمار می‌روند. در روش تحلیل پارامتریک تأثیر یک متغیر با ثابت در نظر گرفتن سایر متغیرها بر تابع هدف بررسی می‌گردد. در حالی که در روش دوم تأثیر ترکیب چند متغیر با یکدیگر بر تابع هدف سنجش و بهینه‌یابی به صورت چندمتغیره انجام می‌پذیرد (Jalali, Noorzai, and Heidari 2020). بهینه یابی شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقات به عنوان متغیر مستقل با توجه به همبستگی با عملکرد، سازه، بازدهی اقتصادی، زیبایی شناسی فرم و سیستم های دسترسی عمودی، بدون در نظر گرفتن تاثیر آن بر مؤلفه‌های یاد شده، منجر به کاهش اعتبار نتایج و تک بعدی بودن بهینه-سازی می‌گردد. برای مثال تعیین بهینه‌ترین هندسه پلان طبقات یک ساختمان بلند اداری صرفا با هدف دستیابی به حداکثر بهره‌مندی از روشنایی طبیعی غالبا پاسخ مناسبی باتوجه به نیازهای عملکردی، سازه‌ای و یا بازدهی اقتصادی نیست.

بنابراین، این پژوهش از طریق محدودکردن دامنه جست‌وجوی پاسخ بهینه، احتمال دستیابی به پاسخ منطقی و کاربردی‌تر را افزایش می‌دهد. این روش از طریق ترکیب داده‌های حاصل از مطالعه تجربی و تئوری ساختمان‌های بلند اداری، دامنهٔ جست‌وجو پاسخ را محدود و تعیین می‌نماید. ازاین‌رو بر اساس نمودار (تصویر ۱)، در گام نخست به روش تجربی داده‌های ۱۰۰ ساختمان بلند اداری مطالعه و اطلاعات موردنیاز از آن‌ها جمع‌آوری گردیده است. در گام دوم، تحلیل داده‌ها منجر به تعیین الگوهای رایج طراحی به روش تجربی می‌گردد. افزون بر این، ضوابط و استانداردهای پیشنهادی طراحی ساختمان‌های بلند اداری نیز منجر به محدودتر کردن دامنه جست‌وجو در میان این الگوها می‌گردد. در انتها شبیه‌سازی و بهینه‌یابی هریک از متغیرها در محدوده‌های تعیین شده انجام می‌پذیرد.

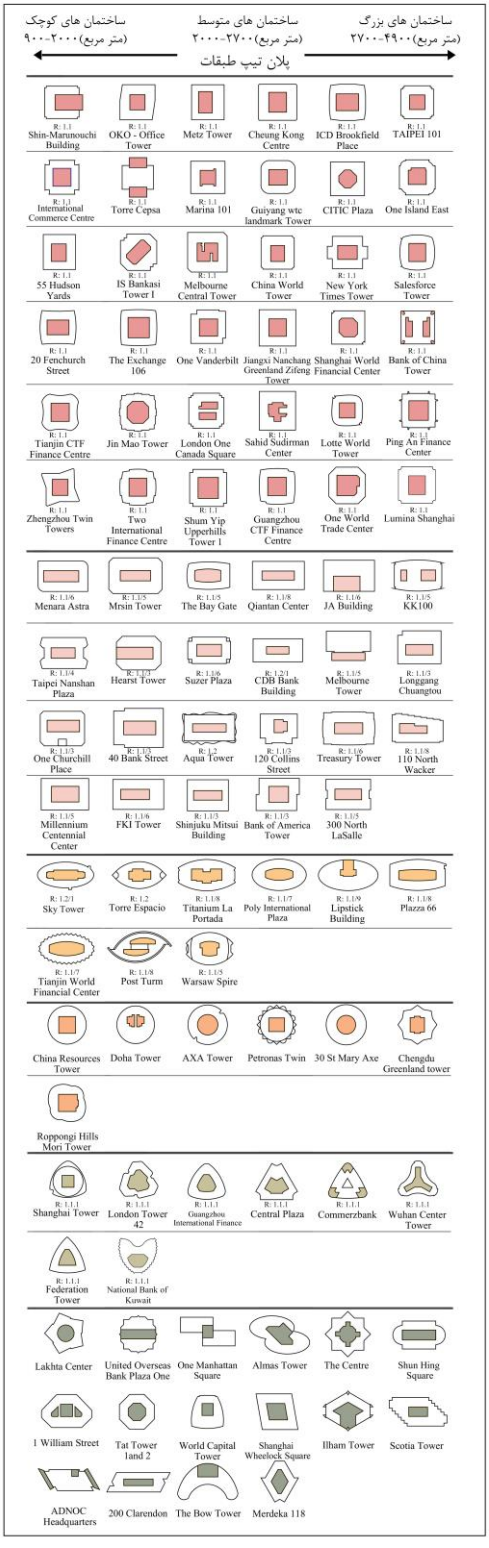
ازاین‌رو نتایج بهینه‌یابی شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقه با انطباق بیشتری نسبت به سایر عوامل مؤثر در طراحی تهیه و کاربردی‌تر به نظر می‌رسند.

لازم به ذکر است که تعداد نمونه‌های مطالعه و بررسی شده بر اساس محدودیت‌های نگارنده در دسترسی به داده‌های بیشتر و همچنین به تکرار رسیدن الگوها در بررسی سایر نمونه‌ها حاصل شده است. ازآنجایی‌که ساختمان‌های بلندمرتبه در ایران و تهران پدیده‌ای تقریباً نوظهور به شمار می‌رود، داده‌های چندانی نیز از آن‌ها در دسترس نیست. این موضوع خود یکی از علل انجام این پژوهش و پژوهش‌های مشابه برای ایجاد داده‌هایی به‌عنوان راهنمای طراحی ساختمان‌های بلند در کلان‌شهر تهران است. ازاین‌رو نمونه‌های موردمطالعه برای کاهش تأثیر موقعیت جغرافیایی، تاحدامکان از نقاط مختلف گردآوری گردیده است. ازآنجایی‌که عملکرد نور روز متغیر وابسته به عرض جغرافیایی و شرایط اقلیمی به شمار می‌رود و هدف این پژوهش بهینه‌یابی شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع طبقه باهدف دستیابی به حداکثر شاخص sDA به عنوان شاخص سنجش میزان روشنایی در محیط داخلی در شهر تهران است، نیازی به محدود کردن نمونه‌ها به اقلیم مشخصی وجود ندارد. سایر مؤلفه‌ها مؤثر بر طراحی ساختمان‌های بلند اداری عمدتاً مستقل از اقلیم و عرض جغرافیایی به‌حساب می‌آیند. جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز نیز از طریق اطلاعات منتشر شده توسط طراحان ساختمان-های بلندمرتبه و همچنین داده‌های دو وب‌سایت skyscrapercenter.com و emporis.com توسط نگارنده گردآوری شده است.

پس از جمع‌آوری اطلاعات، تحلیل داده‌ها و تعیین محدوده بهینه‌یابی، میزان حساسیت شاخص sDA، نسبت به هریک از متغیرها با ثابت درنظرگرفتن مدل پایه و تغییر یک متغیر مستقل سنجیده شده است. در انتها تابع هدف هریک از مدل‌های ایجاد شده با یکدیگر مقایسه و نتیجتاً میزان تأثیرگذاری هر متغیر محاسبه و نتایج آن گزارش شده است.

تصویر ۱- چهارچوب تحقیق (مأخذ: نگارنده)

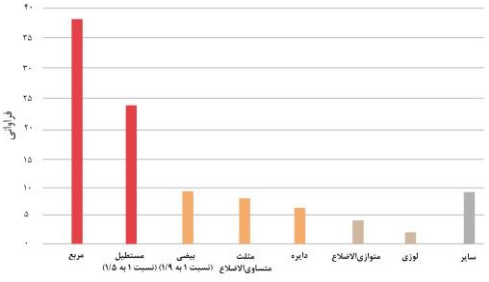
۵-۱ جمع‌آوری و تحلیل داده



تصویر ۲- شکل و تناسبات هندسی پلان، مساحت و نسبت مساحت هسته به مساحت طبقه در ساختمان‌های بلند اداری (مأخذ: نگارنده)

۵-۱-۱ هندسه پلان

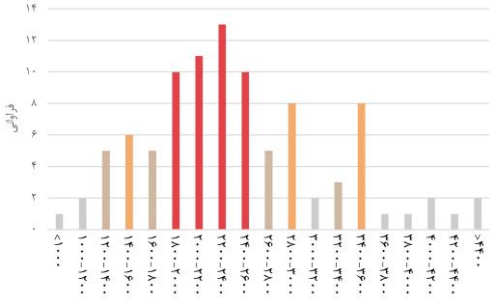
شکل و تناسبات هندسی پلان طبقات، از عوامل اصلی در تعیین فرم ساختمان‌ها است (Szolomicki and Golasz-Szolomicka 2019). بر اساس تحلیل داده‌های گردآوری شده از بررسی ساختمان‌های بلند اداری در (تصویر ۲)، اشکال مربع، مستطیل با تناسبات طول به عرض ۱/۵ به ۱، بیضی با تناسبات طول به عرض ۱/۹ به ۱، مثلث متساوی‌الاضلاع، دایره، متوازی‌الاضلاع و لوزی به ترتیب طبق نمودار (تصویر ۳)، فراوان‌ترین الگوهای هندسی پلان ساختمان‌های بلند اداری به شمار می‌روند. پلان مربع و مستطیل به دلیل عملکرد مناسب در برابر نیروهای جانبی به جهت تقارن هندسی و همچنین سازماندهی عملکردی آسان‌تر در فضا از محبوبیت بالاتری نسبت به سایر الگوهای هندسی در میان طراحان ساختمان‌های بلند اداری برخوردارند.



تصویر ۳- فراوانی الگوهای هندسی پلان ساختمان‌های بلند اداری (مأخذ: نگارنده)

۵-۱-۲ مساحت

بررسی الگوی مساحتی ساختمان‌های بلند اداری بر اساس نمودار (تصویر ۴)، بازهٔ مساحتی ۱۲۰۰ تا ۳۶۰۰ مترمربع را به‌عنوان متراکم‌ترین محدودهٔ مساحتی نشان می‌دهد. براین‌اساس، متغیرهای هندسی موردمطالعه در این پژوهش، جهت ساده‌سازی مطالعه و نتایج حاصل از آن، در سه مساحت ۱۵۰۰ مترمربع برای بازهٔ مساحتی ساختمان‌های با مساحت کمتر از ۱۸۰۰ مترمربع (ساختمان‌های کوچک)، مساحت ۲۵۰۰ مترمربع برای بازهٔ ۱۸۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمربع (ساختمان‌های متوسط) و مساحت ۳۵۰۰ مترمربع برای ساختمان‌های با مساحت بیش از ۳۰۰۰ مترمربع، (ساختمان‌های بزرگ) در نظر گرفته شده است.

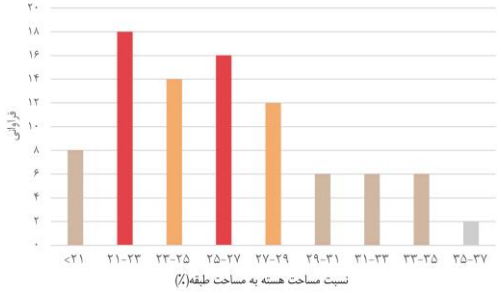


تصویر ۴- بازه‌های مساحتی متداول در ساختمان‌های بلند اداری (مأخذ: نگارنده)

۵-۱-۳ نسبت مساحت هسته به مساحت طبقه

بررسی سیستم‌های سازه‌ای رایج در ساختمان‌های بلند اداری، استفاده از سیستم هستهٔ مرکزی را به‌عنوان متداول‌ترین سیستم سازه‌ای در این ساختمان‌ها نشان می‌دهد. از هسته علاوه بر نقش سازه‌ای، به‌عنوان فضایی برای گنجاندن دسترسی‌های عمودی و فضاهای خدماتی نیز استفاده می‌شود (Szolomicki and Golasz-Szolomicka 2019). دستیابی به نور طبیعی در این مناطق به جهت عدم اشغال دائمی فضا توسط افراد و اختصاص یافتن آن به فضاهای دسترسی و خدماتی، ضروری نیست، همچنین بر اساس دستورالعمل استاندارد روشنایی لید، برای شبیه‌سازی نور روز بر اساس شاخص‌های ارزیابی پویا، فضاهایی که غالبا توسط کاربران استفاده می‌شود، در فرایند شبیه سازی مورد ارزیابی قرار می گیرند. بنابر این، با توجه به کاسته شدن مساحت هستهٔ ساختمان از مساحت طبقه، در شبیه سازی نور روز، نسبت مساحت هسته به مساحت طبقه از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. به عنوان یک قاعدهٔ کلی، در ساختمان‌های بلند با هستهٔ مرکزی، نسبت مساحت مفید فضا نباید از ۷۵٪ کل مساحت طبقه کمتر باشد. این در حالی است که نسبت ۸۰ تا ۸۵٪ به عنوان نسبت بهینهٔ مساحت مفید به مساحت کل طبقه مطلوب است (Raji, Tenpierik, and Van den Dobbelsteen 2017).

بررسی الگوی طراحی هسته نسبت به مساحت طبقه بر اساس مطالعه انجام شده بر روی ساختمان‌های بلند در (تصویر۵) نشان می دهد، که این نسبت غالبا در بازه‌ی ۲۱ تا ۲۹٪ قرار می‌گیرد. از این رو، جهت کاهش متغیرها در فرآیند شبیه‌سازی، نسبت «مساحت هسته به مساحت طبقه[۱۲]»، ۲۵٪ در نظر گرفته شده است.



تصویر ۵- نسبت مساحت هسته به مساحت طبقه (٪) در ساختمان‌های بلند اداری بر اساس میزان فراوانی داده‌ها (مأخذ: نگارنده)

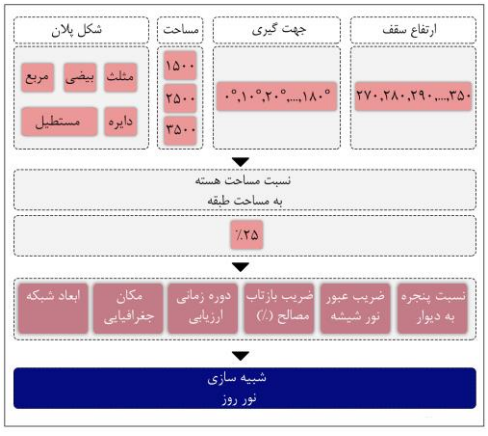
۵-۱-۴ ارتفاع طبقه

محبوبیت روز افزون فضاهای اداری با پلان باز منجر به تمایل طراحان به ایجاد طبقات یکدست‌تر با ارتفاع بیشتر جهت ارتقاء کیفیت بصری فضا برای کاربران گردیده است. افزایش ارتفاع طبقه همچنین امکان نفوذ نور طبیعی به عمق بیشتری از ساختمان را فراهم می کند. در مقابل، افزایش ارتفاع منجر به افزایش انرژی مصرفی برای سرمایش و گرمایش فضا نیز می‌گردد. همچنین کاهش تعداد طبقات ساختمان یک عامل نامطلوب برای توسعه‌دهندگان و سازندگان ساختمان‌های بلندمرتبه به شمار می‌آید. بر اساس «استاندارد طراحی فضاهای اداری آمریکا[۱۳]»، حداقل ارتفاع استاندارد سقف برای ساختمان‌های اداری با مساحت حداقل ۱۴ متر مربع معادل ۲۷۰ سانتی متر است (U.S.Genral services administration 2019). بر این اساس در این پژوهش بازه‌ی مورد مطالعهٔ ارتفاع سقف در فرآیند شبیه‌سازی، حداقل ۲۷۰ سانتی متر (بر اساس استاندارد یاد شده) و حداکثر ۳۵۰ سانتی متر (بر اساس بررسی حداکثر ارتفاع خالص ساختمان‌های بلند اداری مطالعه شده در تصویر ۲) در نظر گرفته شده است.

۵-۲ مدل‌سازی پارامتریک

برای ارزیابی تأثیر متغیرهای هندسی مؤثر بر دریافت نور روز در ساختمان‌های بلند اداری، نیاز به مطالعهٔ مدل‌های متعددی جهت یافتن میزان تأثیر هریک از متغیرها بر میزان روشنایی فضای داخلی و یافتن بهینه‌ترین حالت آن‌ها است. زمانی که تعداد متغیرهای ارزیابی، بیش از

یک متغیر باشد، ساخت مدل‌های متعدد با تغییر در یک متغیر با شیوه‌های مرسوم درگذشته و به شکل دستی بسیار زمان‌بر و دشوار است. ارزیابی متغیرها به شیوهٔ پارامتریک، بستری برای ایجاد مدل‌های متعدد با قابلیت تغییر متغیرها برای تمامی مدل‌ها به‌جای تغییر در یکایک آن‌ها به شکل دستی فراهم می‌آورد. مزیت استفاده از طراحی پارامتریک در این پژوهش سازماندهی متغیرهای مختلف در یک روش ساده شده است، به‌گونه‌ای که به شکل خودکار مدل‌های متعددی از حالات ممکن برای یک متغیر ایجاد می‌کند. این امر امکان بررسی شمار بیشتری از متغیرها را در زمان کمتر و بادقت بیشتر فراهم می‌آورد (Ardekani et al. 2020). ساخت مدل پارامتریک در این پژوهش از طریق افزونه «گرس‌هاپر[14]» در نرم افزار «راینو[15]» نسخه۷ صورت گرفته است. همانطور که در دیاگرام (تصویر۶) نشان داده شده است، چهار متغیر مورد مطالعه شامل ۵ هندسه پلان، ۳ بازه مساحتی و ۱۰ ارتفاع طبقه و جهت‌گیری‌های مختلف ساختمان نسبت به راستای جنوب می باشد.



تصویر ۶- دیاگرام ارزیابی پارامتریک نور روز

(مأخذ: نگارنده)

۵-۳ شبیه‌سازی

نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به‌عنوان بهترین راهکار و ابزاری جدایی‌ناپذیر برای طراحی ساختمان‌هایی با عملکرد بالا به شمار می‌روند (فدایی اردستانی، حیدر ناصری مبارکی، محمدرضا آیت‌اللهی ۱۳۹۷). انتخاب مناسب‌ترین نرم‌افزار باتوجه به تعدد این نرم‌افزارها، پیچیدگی آن‌ها و اهداف پروژه نیازمند بررسی و مطالعه است. موتورهای شبیه‌سازی متعددی برای شبیه‌سازی نور روز وجود دارد، لیکن، موتور معتبری که پایهٔ اکثر نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است، «رادیانس[16]» نام دارد. عملکرد این موتور شبیه‌سازی به‌صورت ایستا است و امکان محاسبهٔ میزان روشنایی در زمان‌های مشخصی از سال را فراهم می‌کند. از این‌رو، برای ارزیابی تغییرات روشنایی در کل سال یا در یک بازهٔ موردنظر، نرم‌افزار معتبر تکمیلی دیگری به نام «دی‌سیم[17]» معرفی شده است. دی‌سیم، شبیه‌سازی سالیانهٔ روشنایی را با استفاده از داده‌های آب‌وهوایی انجام می‌دهد و تفاوت اصلی آن در افزایش سرعت محاسبات نسبت به رادیانس است (Mardaljevic 1999). یکی از رابط‌های کاربری متداول دی‌سیم، «هانی‌بی[18]» است که علاوه بر دردسترس‌بودن آن به‌منزلهٔ افزونه‌ای برای نرم‌افزار گرس‌هاپر نوشته شده است. بودن بر بستر پارامتریک خود گویای برتری این نرم افزار نسبت به محیط‌هایی مانند «اکوتکت[19]»، «دیزاین بیلدر[20]» و سایر نرم‌افزارها است. در این پژوهش جهت انجام فرایند شبیه‌سازی نور روز از دو موتور رادیانس و دی‌سیم تعبیه شده در افزونه هانی‌بی استفاده شده است.

هانی‌بی با گرافیکی کردن نتایج حاصل از شبیه‌سازی نور روز توسط موتورهای شبیه‌سازی دی‌سیم و رادیانس منجر به فهم آسان‌تر نتایج و مقایسهٔ آن‌ها در حالات مختلف با یکدیگر می‌گردد. همچنین پارامتریک بودن آن امکان اتصال به افزونه‌های بهینه‌یابی مانند «گالاپاگوس[21]» را برای یافتن حالت بهینه از میان محدوده جواب‌های مورد بررسی به شکل خودکار فراهم می‌آورد. همچنین به دلیل ماهیت پارامتریک بودن این نرم‌افزار، امکان تغییر در هریک از متغیرها مانند ارتفاع و مساحت طبقه، هندسهٔ و جهت‌گیری پلان در حالات مختلف را در مدل به نحوی فراهم می‌آورد که نرم‌افزار خود مجدداً به شکل خودکار با تغییر متغیرهای ورودی، شبیه‌سازی را انجام داده و نیاز به مدل‌سازی متعدد برای تغییر هر متغیر نمی‌باشد.

۵-۳-۱ اعتبارسنجی نرم‌افزار

باتوجه‌به آنچه ذکر گردید، نرم‌افزار رادیانس امکان شبیه‌سازی نور روز در شرایط مختلف آسمان مانند آسمان صاف (با خورشید یا بدون خورشید)، استاندارد (آسمان ابری) و یا آسمان یکنواخت را فراهم می‌کند. برنامه شبیه‌ساز دی سیم نیز برای محاسبه سطح نور روز با همه شرایط آسمانی ممکن در طول سال بر اساس شاخص‌های دینامیک نور روز می‌پردازد و این مهم‌ترین دلیل برای ایجاد نتایج واقعی‌تر و سنجش معتبرتر آن است. مطالعهٔ انجام شده توسط لائودی و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی رادیانس و دی سیم، نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی با موتورهای مذکور می‌تواند به یک مدل عددی بسیار دقیق در فضاها دست یابد. (Laouadi, Reinhart, and Bourgeois 2008)
همچنین بررسی اعتبار و صحت سنجی میدانی موتور شبیه‌سازی دی سیم در بستر هانی‌بی در پژوهش پوراحمدی در شهر تهران نشان می‌دهد که به طور متوسط مقادیر روشنایی سنجیده شده در شبیه‌سازی تا حد بسیار زیادی نزدیک به‌اندازه واقعی است. همین تفاوت اندک نیز عمدتاً به دلیل عدم تطابق وضعیت آسمان با آسمان واقعی در شبیه‌سازی، همچنین دقیق نبودن محاسبه میزان انعکاس سطوح مختلف توسط پژوهشگر، وجود مبلمان و ساختمان‌های مجاور پدیدآمده است که خطای منطقی به نظر می‌رسد و قابل‌چشم‌پوشی است (پوراحمدی، خانمحمدی، مظفر ۱۳۹۸). از این رو با توجه به اعتبار سنجی موتورهای شبیه سازی رادیانس و دی‌سیم بر بستر نرم‌افزار هانی‌بی در پژوهش های متعدد (McNeil and Lee 2012; Kharvari 2020)، این پژوهش از موتور دی سیم بر بستر هانی‌بی استفاده می کند.

۵-۳-۲ مفروضات شبیه‌سازی

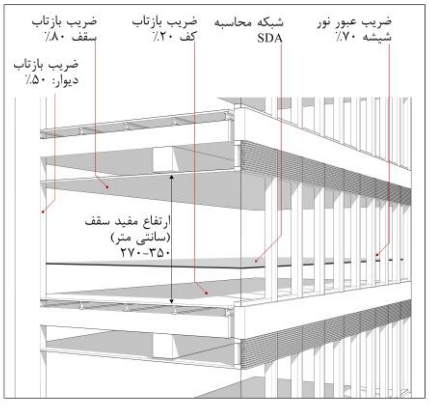
داده‌های اولیه به‌عنوان ورودی برای ساخت مدل، بر اساس نتایج حاصل از مطالعه ساختمان‌های بلند اداری، مقادیر پیشنهادی استاندارد لید نسخه ۴/۱ برای شبیه‌سازی نور روز بر اساس شاخص sDA و استانداردهای طراحی ساختمان‌های بلند اداری تعیین گردیده است. مقادیر مفروض به‌عنوان داده اولیه در فرایند شبیه‌سازی‌های این مطالعه عبارت‌اند از:

- ابعاد شبکهٔ شبیه‌سازی ۶۰ سانتیمتر در ۶۰ سانتیمتر فرض گردیده است. همچنین این شبکه در ارتفاع سطح میز کار (۷۶ سانتیمتر از سطح تمام شده طبقه) در نظر گرفته شده است.
- کلیه شبیه‌سازی‌ها با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه آب‌وهوایی (ایستگاه آب‌وهوایی مهرآباد) تهیه گردیده است. شهر تهران در پهنه اقلیمی کوهستانی و در عرض‌های جغرافیایی ۳۴ تا ۳۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ تا ۵۳ درجه قرار دارد. بر اساس داده‌های ایستگاه آب‌وهوایی مهرآباد، آسمان تهران در ۶۴٪ مواقع صاف، ۲۷٪ نیمه‌ابری و ۹٪ اوقات ابری است (Mahdavinejad et al. 2012).
- تمامی سازه‌های دائمی در فضای داخلی در شبیه‌سازی‌ها موردنظر قرار گرفته شده، درحالی‌که از تأثیر مبلمان‌ها و پارتیشن‌های قابل جابه‌جایی چشم‌پوشی شده است.
- ضریب بازتاب مصالح برای سطوح کف، دیواره‌ها و سقف بر اساس دستورالعمل استاندارد روشنایی لید نسخه ۴/۱، در نظر گرفته شده است. (LEED 2019)
- کلیه شبیه‌سازی‌ها به روش ارزیابی پویا و به شکل سالانه و برای فعالیت از ساعت ۹ تا ۵ بعدازظهر به جز روزهای تعطیل در نظر گرفته شده است.
- ابعاد پنجره و ویژگی‌های شیشه فاکتورهای مهمی در میزان ورود نور به فضای داخلی به شمار می‌روند. سیستم دیوار پرده‌ای به عنوان متداول‌ترین سیستم نمای ساختمان‌های بلندمرتبه اداری، به طور معمول از شیشه و فلز ساخته شده است. در فرایند شبیه‌سازی‌ها در این مطالعه، کلیه ساختمان‌ها با دیوار پرده-ای و نسبت پنجره به دیوار (WWR) ۸۵٪ در نظر گرفته شده است. یکی دیگر از عوامل مؤثر بر میزان نور ورودی به فضای داخلی،

ضریب عبور نور شیشه (VT) است که عبارت است از درصد نور مرئی عبوری از شیشه به فضای داخلی نسبت به کل نور تابش شده به آن که در این مطالعه ۷۰٪ در نظر گرفته شده است.

- ضریب بازتاب سطوح خارجی جهت شبیه‌سازی و مقایسهٔ مدل موردمطالعه در طبقات میانی و بالایی ساختمان بلند، با ارتفاع ۶۰ متر از سطح زمین؛ ۲۰٪ فرض گردیده است. لازم به ذکر است که باتوجه‌به ارتفاع مدل و بلندمرتبه بودن ساختمان، میانگین ارتفاع ساختمان‌های شهر تهران و ضوابط فاصلهٔ ساختمان‌های بلند از یکدیگر، از تأثیر سایه‌اندازی ساختمان‌های مجاور چشم‌پوشی شده است.

برای درک بهتر مفروضات اولیه جهت انجام شبیه‌سازی نور روز، (تصویر ۷) ترسیم گردیده است.



تصویر ۷- مؤلفه‌های مفروض در این پژوهش، جهت شبیه‌سازی نور روز (مأخذ: نگارنده)

۶- مبانی نظری

۶-۱ شاخص‌های سنجش میزان روشنایی طبیعی

ارزیابی روشنایی طبیعی در فضا از طریق شاخص‌ها به دو روش میدانی و شبیه‌سازی رایانه‌ای انجام می‌پذیرد. این شاخص‌ها از نظر محدودهٔ زمانی مورد ارزیابی و درنظرگرفتن شرایط آسمان به دو دسته شاخص‌های پویا و شاخص‌های ایستا طبقه‌بندی می‌شوند. مطالعات متعددی اعتبار شاخص‌های سنجش روشنایی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. شاخص‌های پویا به سبب درنظرگرفتن اقلیم و تغییرات وضعیت آسمان، مؤلفه‌های طراحی، شرایط نوری فضا و آسایش بصری کاربران در طول سال، نتایج جامع‌تری در ارزیابی عملکرد نور روز در فضا نشان می‌دهند (C. F. Reinhart, Mardaljevic, and Rogers 2006). از جمله شاخص‌های پویا، می‌توان به «روشنایی قابل‌استفاده نور روز[۲۲]» اشاره کرد، این شاخص نسبتی از دوره اشغال در طول یک سال است که روشنایی افقی در یک نقطه مشخص، در محدوده معینی باشد. با درنظرگرفتن مقادیر حد پایین و حد بالای روشنایی، محدوده زمانی ارزیابی شده به سه قسمت تقسیم می‌شود: مدت زمانی که روشنایی ناشی از نور روز بسیار کم است، مقدار مناسبی دارد و یا به‌قدری زیاد است که منجر به نبود آسایش بصری می‌شود. مقادیر تعیین شده حد بالا و پایین برای این شاخص در منابع مختلف متفاوت است، اما عموماً مقدار ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ لوکس با عنوان محدوده کفایت نور پیشنهاد می‌شود. (Nabil and Mardaljevic 2006)

«کفایت نور روز[۲۳]» شاخص دینامیک دیگری است که کافی بودن نور روز در فضای داخلی را نشان می‌دهد و برابر است با درصدی از دوره زمانی اشغال فضا در طول یک سال که در آن مقدار روشنایی موردنیاز در نقطه‌ای معین از فضا به‌تنهایی توسط روشنایی طبیعی قابل تأمین باشد. چارچوب استاندارد روشنایی لید نسخه ۴/۱، $sDA_{300/50\%}$ را برای تحلیل کفایت نور پیشنهاد می‌کند، یعنی درصدی از نقاط سطح که روشنایی بیش از ۳۰۰ لوکس را در حداقل ۵۰٪ زمان اشغال دریافت می‌کنند. شاخص sDA مهم‌ترین شاخص پویا برای ارزیابی کافی بودن میزان روشنایی طبیعی ورودی در فضای داخلی به شمار می‌رود. رینهارت و وینولد، در پژوهشی در دانشگاه کمبریج آمریکا، شاخص کفایت فضایی نور روز را هماهنگ‌ترین شاخص با نظر کاربران و شاخص‌های روشنایی مفید نور روز و فاکتور نور روز را با انطباق کمتری با نظر کاربران ارزیابی کرده‌اند (C. Reinhart and Wienold 2011). در پژوهش دیگری

در سال ۲۰۰۹، ماردلجویچ و همکاران با بررسی گسترده در فضاهایی با کاربری های مختلف، شاخص کفایت فضایی نور روز و «تابش مستقیم سالانه نور خورشید[۲۴]» را دو شاخص معتبر برای سنجش رضایت کاربران از میزان روشنایی و خیرگی پیشنهاد کرده اند (Mardaljevic, Heschong, and Lee 2009). مقدم و همکاران در شهر تهران، با موضوع «کارآیی شاخص های نور روز در تخمین روشنایی کافی در فضا بر اساس ارزیابی کاربران» نشان می دهد که از میان شاخص های دینامیک مبتنی بر اقلیم، شاخص کفایت فضایی نور روز با در نظر گرفتن مقدار ۳۰۰ لوکس، برای حد پایین روشنایی، مطابقت بیشتری با ارزیابی کاربران دارد (شفوی مقدم, زمردیان ,تحصیلدوست ۱۳۹۸). از این رو بر اساس این مطالعات، می توان شاخص کفایت فضایی نور روز (sDA) را به عنوان نزدیک ترین شاخص به درک کاربر از میزان روشنایی محیط دانست.

شاخص کفایت فضایی نور روز ($sDA_{300/50\%}$) درصدی از سطح را که حداقل روشنایی موردنیاز (بر اساس استاندارد لید ۳۰۰ لوکس برای فضاهای اداری) در یک بازهٔ زمانی مشخص (۵۰٪ از زمان اشغال فضا) را دریافت می‌کند نشان می‌دهد (Turan et al. 2020).

روش‌های متعددی نظیر استفاده از تابش بندها، نماهای دوپوسته و یا استفادهٔ از شیشه‌های هوشمند می‌تواند نور بیش از اندازه در فضای داخلی را کنترل نماید. لیکن یکی از اصلی‌ترین راهکارهای بهره‌مندی بیشتر از نور طبیعی بهینه‌سازی مؤلفه‌های کالبدی معماری است. ازاین‌رو این پژوهش به ارزیابی مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر روشنایی طبیعی از طریق شاخص کفایت فضایی نور روز می‌پردازد.

در سال‌های اخیر، به‌واسطه گسترش نرم‌افزارهای مرتبط با شبیه‌سازی، شبیه‌سازی عملکرد ساختمان در میزان بهره‌مندی از نور طبیعی در فضای داخلی، اغلب به وسیلهٔ شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای انجام می‌گیرد. برای نزدیک کردن نتایج شبیه‌سازی به ادراک کاربر از فضا، علاوه بر داده‌های عوامل محیطی مؤثر بر میزان نور، مؤلفه‌های طراحی معماری شامل هندسهٔ فضا، نسبت ابعاد هسته به مساحت کل طبقه، ضریب بازتاب مصالح، ضریب عبور نور شیشه، ویژگی‌ها و مشخصات پنجره و نسبت پنجره به دیوار به‌عنوان دادهٔ اولیه برای شبیه‌سازی نور روز لازم است (Heschong et al. 2012). در فرآیند شبیه‌سازی، شبکه‌ای از سنسورها در ارتفاع مشخصی (معمولا ارتفاع سطح کار) قرار می گیرند. داده های به دست آمده توسط هریک از این سنسورها، میزان نور را در فضای داخلی از طریق شاخص‌های ارزیابی اندازه‌گیری و مشخص می‌کند. مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده با مقادیر پیشنهادی در قوانین و استانداردهای نور روز می‌تواند میزان رضایت کاربر از شرایط نوری محیط را نشان دهد.

«شورای ساختمان‌های سبز ایالات متحده[۲۵]»، با توسعهٔ یک سیستم امتیازدهی برای ارزیابی ساخت‌وسازهای پایدار در سال ۱۹۹۸، یک دستورالعمل کلی برای ایجاد ساختمان‌هایی سالم، با بازدهی بالا و کم‌هزینه سبز را تقریباً برای تمامی انواع ساختمان‌ها، شامل ساختمان‌های اداری فراهم آورده است. این پژوهش بر اساس دستورالعمل سیستم امتیازدهی استاندار لید برای ارزیابی عملکرد میزان روشنایی در فضای داخلی در هریک از متغیرهای موردمطالعه صورت‌گرفته است. مقادیر پیشنهادی در سیستم امتیازدهی لید نسخه ۴/۱ برای شاخص SDA در (جدول ۱) نشان‌داده‌شده است.

جدول ۱- سیستم امتیازدهی استاندارد لیید نسخه ۴/۱ بر اساس شاخص sDA (مأخذ: (LEED 2019))

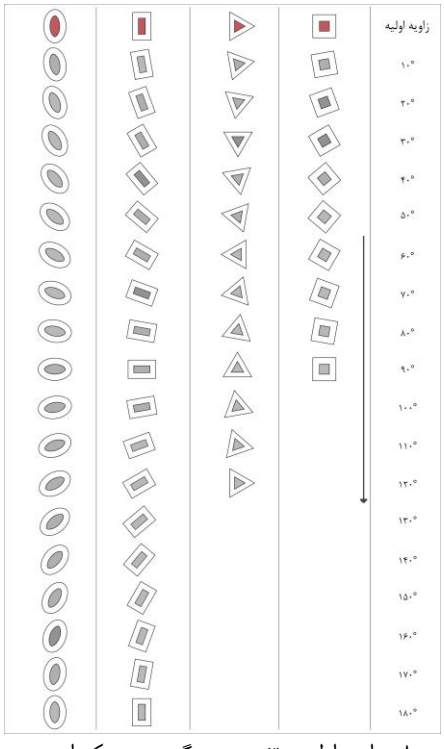
ساختمان‌های جدید	
۱ امتیاز	میانگین شاخص (۵۰٪/۳۰۰) sDA برای سطوحی که در غالب اوقات توسط کاربران مورداستفاده قرار می‌گیرند، حداقل ۴۰٪ باشد.
۲ امتیاز	میانگین شاخص (۵۰٪/۳۰۰) sDA برای سطوحی که در غالب اوقات توسط کاربران مورداستفاده قرار می‌گیرند، حداقل ۵۵٪ باشد.
امتیاز 2	میانگین شاخص (۵۰٪/۳۰۰) sDA برای سطوحی که در غالب اوقات توسط کاربران مورداستفاده قرار می‌گیرند، حداقل ۷۵٪ باشد.

۷- مطالعات و بررسی‌ها

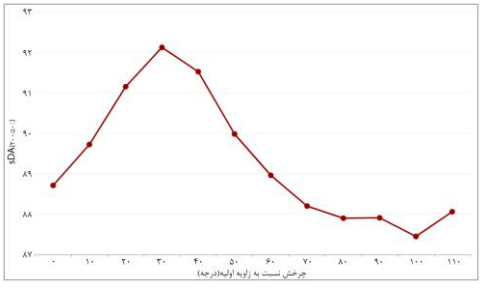
۷-۱ جهت‌گیری

جهت‌گیری مناسب در راستای استفادهٔ بهینه از نور روز می‌تواند منجر به کاهش استفاده از نور مصنوعی از طریق دریافت میزان روشنایی کافی در فضای داخلی ساختمان‌های اداری گردد(Rao 2015). جهت بررسی تاثیر جهت‌گیری بر شاخص sDA، هر کدام از پنج

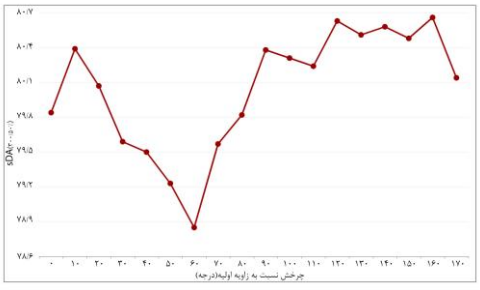
هندسهٔ مورد مطالعه در مدل‌های متعدد با زوایای مختلف با اختلاف ۱۰ درجه با فرض زاویهٔ اولیه بر اساس (تصویر۸) نسبت به یکدیگر شبیه سازی و مقایسه گردیده است. برای حذف تاثیر سایر متغیرها، مساحت، ارتفاع طبقه، ضریب بازتاب مصالح، نسبت پنجره به دیوار (WWR) و نسبت هسته به طبقه برای تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. مقایسه هریک از اشکال هندسی، در جهت‌گیری‌های مختلف نسبت به راستای جنوب در نمودارهای (تصاویر ۹ تا ۱۲) برای هر شکل مشخص شده است.



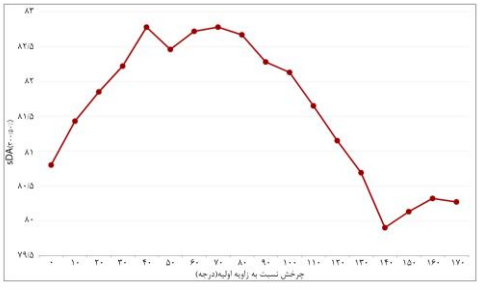
تصویر ۸- زاویه اولیه و تغییر جهت‌گیری هر یک از هندسه‌ها نسبت به راستای جنوب (مأخذ: نگارنده)



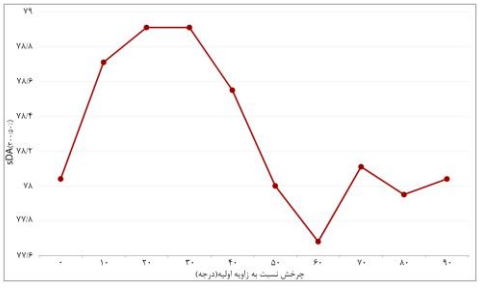
تصویر ۹- تأثیر جهت‌گیری هندسهٔ مثلث متساوی‌الاضلاع بر شاخص sDA (مأخذ: نگارنده)



تصویر ۱۰- تأثیر جهت‌گیری هندسهٔ بیضی با نسبت طول به عرض ۱/۹ به ۱ بر شاخص sDA (مأخذ: نگارنده)



تصویر ۱۱- تأثیر جهت‌گیری هندسهٔ مستطیل با نسبت طول به عرض ۱/۵ به ۱ بر شاخص sDA (مأخذ: نگارنده)



تصویر ۱۲- تأثیر جهت‌گیری هندسهٔ مربع بر شاخص sDA (مأخذ: نگارنده)

۷-۲ شکل و تناسبات هندسی پلان

برای مقایسهٔ تأثیر اشکال هندسی پلان تعیین شده بر عملکرد نور روز از طریق شاخص sDA، هر یک از اشکال در بهترین زاویهٔ تعیین شده بر اساس (نمودارهای ۹ تا ۱۲) شبیه‌سازی و مقایسه گردیده‌اند. سایر متغیرها به‌عنوان متغیر کنترل برای یافتن تأثیر شکل و تناسبات هندسی پلان بر عملکرد نور روز در تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در (جدول‌های ۲ تا ۴)، نتایج شبیه‌سازی بر اساس شاخص sDA در هر یک از اشکال هندسی نشان‌داده‌شده است.

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی بر اساس شاخص sDA برای ساختمان با مساحت طبقه ۱۵۰۰ مترمربع (مأخذ: نگارنده)

sDA (300/ 50%)

مساحت طبقه (مترمربع)	ارتفاع (سانتی‌متر)	مثلث متساوی‌الاضلاع	بیضی (نسبت ۱ به ۱/۹)	مستطیل (نسبت ۱ به ۱/۵)	مربع	دایره
۱۵۰۰	۲۷۰	۹۷/۷۱	۹۱/۰۱	۹۱/۱۵	۹۰/۷۱	۸۶/۶۳
	۲۸۰	۹۹/۴۸	۹۴/۴۴	۹۳/۶۲	۹۴/۳۹	۹۱/۷۸
	۲۹۰	۱۰۰	۹۷/۶۲	۹۶/۰۱	۹۷/۶۶	۹۵/۶۳
	۳۰۰	۱۰۰	۹۹/۳۵	۹۶/۹۳	۹۹/۷۸	۹۹/۰۷
	۳۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸/۵۴	۱۰۰	۱۰۰
	۳۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۵۷	۱۰۰	۱۰۰
	۳۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	۳۴۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	۳۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی بر اساس شاخص sDA برای ساختمان با مساحت طبقه ۲۵۰۰ مترمربع (مأخذ: نگارنده)

sDA (300/ 50%)

مساحت طبقه (مترمربع)	ارتفاع (سانتی‌متر)	مثلث متساوی‌الاضلاع	بیضی (نسبت ۱ به ۱/۹)	مستطیل (نسبت ۱ به ۱/۵)	مربع	دایره
۲۵۰۰	۲۷۰	۷۵/۴۷	۶۷/۶۷	۶۸/۲۷	۶۶/۸۰	۶۲/۵۶
	۲۸۰	۷۹/۵۵	۷۱/۷۶	۷۳/۰۴	۷۰/۵۳	۶۶/۰۴
	۲۹۰	۸۵/۸۹	۷۵/۶۲	۷۸/۱۷	۷۴/۱۴	۶۹/۶۴
	۳۰۰	۹۲/۱۲	۸۰/۶۶	۸۲/۷۸	۷۸/۹۱	۷۴/۰۳
	۳۱۰	۹۴/۸۹	۸۳	۸۷/۰۱	۸۵/۰۸	۷۸/۶۳
	۳۲۰	۹۷/۲۰	۸۷/۶۰	۹۰/۴۱	۹۰	۸۵/۳۷
	۳۳۰	۹۹/۵۵	۹۲/۲۴	۹۲/۸۷	۹۴/۱۳	۹۰/۳۰
	۳۴۰	۱۰۰	۹۵/۲۵	۹۵/۵۶	۹۷/۱۰	۹۵/۲۹
	۳۵۰	۱۰۰	۹۷/۶۶	۹۷/۰۸	۹۹/۸۹	۹۸/۹۷

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی بر اساس شاخص sDA برای ساختمان با مساحت طبقه ۳۵۰۰ مترمربع (مأخذ: نگارنده)

sDA (300/ 50%)

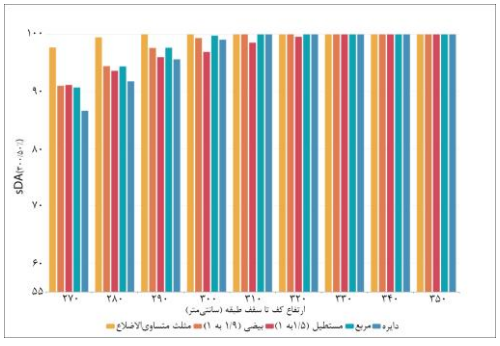
مساحت طبقه (مترمربع)	ارتفاع (سانتی‌متر)	مثلث متساوی‌الاضلاع	بیضی (نسبت ۱ به ۱/۹)	مستطیل (نسبت ۱ به ۱/۵)	مربع	دایره
۳۵۰۰	۲۷۰	۶۲/۵۵	۵۷/۵۱	۵۷/۴۴	۵۶/۲۷	۵۲/۹۹
	۲۸۰	۶۵/۷۰	۵۹/۹۰	۶۰/۳۹	۵۹/۰۷	۵۵/۶۵
	۲۹۰	۶۹/۳۵	۶۲/۸۰	۶۳/۴۲	۶۲/۱۸	۵۸/۳۲
	۳۰۰	۷۲/۹۹	۶۵/۸۸	۶۶/۵۳	۶۵/۱۱	۶۱/۳۹
	۳۱۰	۷۷/۵۷	۶۹/۷۶	۷۰/۶۶	۶۸/۵۲	۶۴/۴۸
	۳۲۰	۸۳/۳۸	۷۴/۳۹	۷۶/۱۵	۷۲/۵۵	۶۸/۴۸
	۳۳۰	۹۰/۶۸	۷۸/۱۶	۸۱/۳۸	۷۷/۶۷	۷۲/۹۰
	۳۴۰	۹۴/۷۵	۸۲/۲۲	۸۶/۶۷	۸۳/۶۳	۷۷/۶۲
	۳۵۰	۹۶/۵۵	۸۶/۰۹	۸۹/۹۷	۸۸/۸۲	۸۲/۶۶

۸- یافته‌های تحقیق

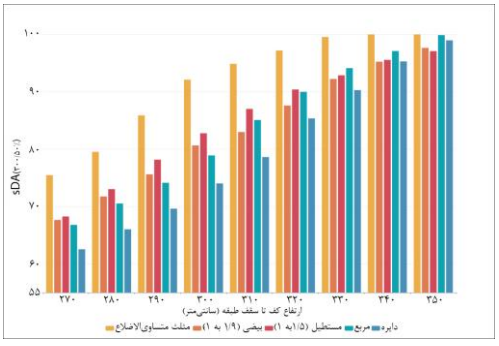
مقایسه نتایج حاصل از بررسی تأثیر جهت‌گیری بر میزان روشنایی طبیعی در فضای داخلی بر اساس شاخص sDA در هریک از اشکال هندسی نشان می‌دهد که تغییر جهت‌گیری ساختمان نسبت به راستای جنوب می‌تواند تا حداکثر ۴/۵٪ در هندسه مثلث متساوی‌الاضلاع منجر به بهبود روشنایی طبیعی در فضای داخلی گردد. این تأثیر در هندسه مستطیل تا ۳٪، بیضی حدود ۲٪ و در مربع به حدود ۱٪ درصد می‌رسد.

همچنین بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی نور روز در اشکال هندسی موردمطالعه در (جداول ۲ تا ۴) و ارزیابی آن در نمودارهای (تصاویر ۱۳ تا ۱۵) نشان می‌دهد که برای هر سه بازهٔ مساحتی ساختمان‌های کوچک، متوسط و بزرگ، و در تمامی حالات مفروض برای ارتفاع طبقه، به ترتیب مثلث متساوی‌الاضلاع بهترین عملکرد در میزان روشنایی نور طبیعی در فضای داخلی بر اساس شاخص sDA، پس از آن مستطیل با نسبت طول به عرض ۱/۵ به ۱ و بیضی با نسبت طول به عرض ۱/۹ به ۱ عملکردی بسیار مشابه به یکدیگر، مربع و در انتها دایره جای می‌گیرند. علاوه بر این نسبت میان ارتفاع طبقه به فاصلهٔ محیط ساختمان تا هسته (عمق مفید ساختمان) و

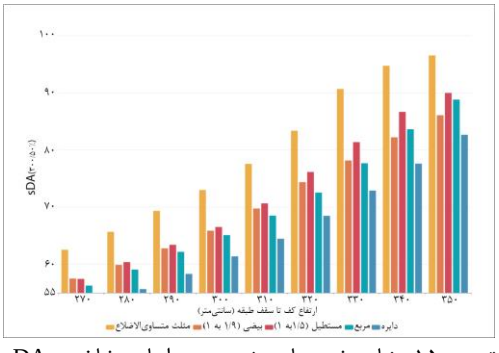
ارتباط آن با شاخص sDA نشان می‌دهد که بین این دو نسبت یک رابطه تقریباً خطی برقرار است. به‌عبارت‌دیگر با فرض ثابت درنظرگرفتن معیار مذکور، در هنگام افزایش مساحت پلان طبقه، ارتفاع آن با نسبتی تقریباً خطی افزایش می‌یابد. باتوجه‌به نمودار (تصویر ۱۳)، می‌توان بیان داشت، در ساختمان‌های بلندمرتبه اداری با هسته مرکزی و سیستم نمای دیوار پرده‌ای با مساحت تقریبی ۱۵۰۰ مترمربع یا کوچک‌تر در شهر تهران در تمامی هندسه‌های مذکور، حداکثر امتیاز استاندارد لید نسخه ۴/۱ برای شاخص ارزیابی sDA دریافت می‌گردد. همچنین بر اساس نمودار (تصویر ۱۴)، برای ساختمان‌هایی با مساحت تقریبی ۲۵۰۰ مترمربع یا کوچک‌تر، تنها در هندسه مثلث و در تمامی ارتفاع‌های استاندارد ساختمان‌های بلندمرتبه اداری حداکثر امتیاز استاندارد لید برای شاخص sDA اخذ می‌گردد، درحالی‌که برای دستیابی به این امتیاز، حداقل ارتفاع ۲/۹ متر برای دو هندسه مستطیل و بیضی لازم است. هندسه‌های مربع و دایره نیز به ترتیب با حداقل ارتفاع ۳ و ۳/۱ متر هر سه امتیاز استاندارد لید را دریافت می‌کنند. همچنین بر اساس نمودار (تصویر ۱۵)، برای ساختمان‌هایی با مساحت ۳۵۰۰ مترمربع یا کمتر، هیچ یک از اشکال هندسی پلان، تا ارتفاع ۳/۱ متر، حداکثر امتیاز استاندارد لید برای روشنایی طبیعی فضای داخلی بر اساس شاخص sDA را به دست نمی‌آورند.



تصویر ۱۳- نتایج شبیه‌سازی نور روز بر اساس شاخص sDA برای ساختمان‌های با مساحت طبقهٔ کوچک (۱۵۰۰ مترمربع) (مأخذ: نگارنده)



تصویر ۱۴- نتایج شبیه‌سازی نور روز بر اساس شاخص sDA برای ساختمان‌های با مساحت طبقهٔ متوسط (۲۵۰۰ مترمربع) (مأخذ: نگارنده)



تصویر ۱۵- نتایج شبیه‌سازی نور روز بر اساس شاخص sDA برای ساختمان‌های با مساحت طبقهٔ بزرگ (۳۵۰۰ مترمربع) (مأخذ: نگارنده)

۹- نتیجه تحقیق

استفاده از نور روز برای روشنایی فضای داخلی، بهبود کیفیت فضاهای اداری، عملکرد و سلامت کارکنان را به دنبال دارد. علاوه بر این، بهره‌مندی از نور طبیعی منجر به کاهش انرژی الکتریکی مصرفی در بخش روشنایی مصنوعی و در نتیجه کاهش اثرات نامطلوب ناشی از سوخت‌های فسیلی بر محیط‌زیست می‌گردد. مقیاس و پیچیدگی طراحی ساختمان‌های بلندمرتبه و همچنین مزایای استفاده از نور طبیعی در ساختمان‌های اداری، اهمیت دستورالعمل‌های طراحی برای ارتقا عملکرد نور روز ساختمان را در مراحل آغازین، دوچندان می‌کند. این پژوهش از میان متغیرهای طراحی مؤثر بر کیفیت و کمیت روشنایی طبیعی در فضای داخلی، به بهینه‌یابی و تحلیل ارتباط میان سه متغیر، شکل و تناسبات هندسی پلان، جهت‌گیری و ارتفاع مفید طبقه با شاخص sDA، به‌عنوان نزدیک‌ترین شاخص سنجش میزان روشنایی با

ادراک کاربر می‌پردازد. همچنین شبیه‌سازی نور روز به روش مدل‌سازی روشنایی مبتنی بر اقلیم و مدل‌سازی پارامتریک در اقلیم شهر تهران انجام گردیده است. باتوجه‌به تأثیر عوامل متعدد در طراحی ساختمان‌های بلندمرتبه، بهینه‌سازی متغیرهای هندسی به‌عنوان متغیرهای مستقل در این پژوهش با هدف بهره‌مندی از حداکثر روشنایی در محیط داخلی بدون تعریف محدودهٔ کمی و کیفی مجاز برای آن‌ها، منجر به کاربردی نبودن نتایج و کاهش اعتبار آن می‌گردد. جمع‌آوری داده‌های طراحی ساختمان‌های بلند اداری و تحلیل فراوانی هریک از الگوهای حاصل بازهٔ مجاز بهینه‌یابی متغیرهای مستقل در این پژوهش را تعیین می‌نماید. نتایج بررسی و تحلیل الگوهای طراحی ساختمان‌های بلند اداری نشان می‌دهد که به ترتیب هندسه پلان مربع، مستطیل با تناسبات طول به عرض ۱/۵ به ۱ بیضی با تناسبات طول به عرض ۱/۹ به ۱، مثلث متساوی‌الاضلاع و دایره، فراوان‌ترین الگوهای هندسی پلان هستند. ساختمان‌هایی با مساحت ۱۸۰۰ تا ۲۶۰۰ مترمربع، فراوان‌ترین بازهٔ مساحتی ساختمان‌های بلند اداری است. الگوهای طراحی پلان نسبت مساحت هسته به مساحت طبقه را در بازهٔ ۲۱ تا ۲۹ درصد نشان می‌دهد. حداکثر و حداقل ارتفاع طبقه در ساختمان‌های بلند اداری نیز در بازهٔ ۲/۷ متر تا ۳/۵ متر قرار می‌گیرد.

بر اساس نتایج این پژوهش، با درنظرگرفتن شاخص sDA به‌عنوان معیاری برای سنجش روشنایی طبیعی فضای داخلی، شکل و تناسبات هندسی پلان تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص sDA می‌گذارد. این نتایج نشان می‌دهد در طراحی ساختمان‌های بلند اداری شهر تهران، مثلث متساوی‌الاضلاع، بهترین عملکرد و پس از آن بیضی، مستطیل مربع و دایره به ترتیب در جایگاه بعدی این مطالعه قرار می‌گیرند. تغییر در انتخاب هریک از این پنج هندسه با ثابت درنظرگرفتن ارتفاع و مساحت، می‌تواند تا ۱۰٪ منجر به بهبود شاخص sDA گردد، به عبارتی امکان استفاده از ۱۰٪ بیشتر فضا برای کاربران با میزان روشنایی کافی در طول سال فراهم می‌آید. این موضوع می‌تواند منجر به افزایش فضای مفید و باکیفیت ساختمان و ارزش‌افزوده بدون نیاز به هزینه بیشتر گردد. همچنین، با فرض ثابت انگاشتن سایر متغیرها، تغییر در زاویهٔ پلان نسبت به راستای جنوب از تأثیر کمتری نسبت به تغییر شکل و هندسه پلان بر شاخص sDA برخوردار است. به‌گونه‌ای که تغییر در جهت‌گیری پلان نسبت به راستای جنوب بیشترین تأثیر را در هندسه مثلث متساوی‌الاضلاع و کمترین تأثیر را در هندسه مربع نشان می‌دهد. بدیهی است تغییر جهت‌گیری در هندسهٔ دایره بر شاخص مذکور تأثیری نخواهد داشت. به‌طورکلی، در هندسهٔ مثلث متساوی‌الاضلاع، زاویهٔ ۳۰ درجه پادساعت‌گرد، نسبت به زاویهٔ اولیه بهترین زاویه به جهت حداکثر میزان روشنایی در فضای داخلی بر اساس شاخص sDA، است. این زاویه برای هندسهٔ بیضی (۱۶۰ درجه)، مربع (۲۰ و ۳۰ درجه) و مستطیل (۴۰ و ۷۰ درجه) است. همچنین برای ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر تهران با نسبت پنجره به دیوار حداقل ۸۵٪ و ضریب بازتاب مصالح طبق استاندارد لید، جهت دستیابی به حداکثر امتیاز استاندارد روشنایی لید بر اساس شاخص sDA، برای ساختمان‌هایی با مساحت تقریبی ۱۵۰۰ مترمربع و کمتر، ارتفاع سقف ۲۷۰ سانتی‌متر برای تمامی اشکال هندسی، برای ساختمان‌های با مساحت تقریبی ۲۵۰۰ مترمربع و یا کمتر، حداقل ارتفاع ۲۷۰ سانتی‌متر برای هندسهٔ مثلث و حداکثر ارتفاع ۳/۱ متر برای هندسهٔ دایره و برای ساختمان‌های با مساحت تقریبی ۳۵۰۰ مترمربع و کمتر، حداقل ارتفاع ۳/۱ متر برای هندسهٔ مثلث و حداکثر ارتفاع ۳/۴ متر برای هندسهٔ دایره پیشنهاد می‌گردد. نتایج حاصله از طریق شبیه‌سازی اقلیمی در شهر تهران انجام‌گرفته است. بدیهی است اعتبار این نتایج برای این شهر و شهرهایی با عرض جغرافیایی و شرایط اقلیمی یکسان قابل استناد و استفاده است.

این نتایج راهنمایی برای طراحان و معماران ساختمان‌های بلندمرتبه، جهت طراحی بهینهٔ مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر نور روز در ساختمان‌های بلند اداری فراهم می‌آورد. از کاربردهای نتایج این پژوهش برای معماران و طراحان ساختمان‌های بلند اداری در شهر تهران، می‌توان به انتخاب شکل و تناسبات هندسی بهینه پلان در مراحل آغازین طراحی جهت دستیابی به نور طبیعی کافی در فضای داخلی اشاره کرد. همچنین داده‌های این پژوهش دستورالعملی را برای تعیین ارتفاع

طبقات با رویکرد دستیابی به حداکثر نور روز ضمن توجه به سایر مؤلفه‌های بازدارنده افزایش ارتفاع سقف به‌خصوص مؤلفه اقتصادی فراهم می‌آورد. بر اساس نتایج این پژوهش کارفرمایان و طراحان این ساختمان‌ها می‌توانند با تغییر در شکل هندسی پلان با ارتفاع کمتری به میزان روشنایی کافی در فضای داخلی دست یابند. ازاین‌رو می‌توان در ارتفاع مشخص تعداد طبقات بیشتر و به‌تبع آن بازدهی اقتصادی بالاتری را نیز انتظار داشت. پژوهش‌های آینده در جهت تکمیل ادامهٔ این تحقیق می‌توانند به بررسی و بهینه‌یابی پارامترهای مذکور در این پژوهش باتوجه‌به شاخص (ASE) به‌عنوان معیاری برای سنجش خیرگی در فضا که در تقابل با شاخص sDA قرار می‌گیرد، بپردازند.

۱۰- تشکر و قدردانی

موردی از طرف نویسندگان مطرح نشده است

۱۱- پی‌نوشت‌ها

1- Daylight Performance
2- Window to Wall Ratio (WWR)
3- Visual Transmittance (VT)
4- Spatial Daylight Autonomy (SDA)
5- Daylight Factor (DF)
6- Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)
7- Window to Floor Ratio (WFR)
8- Window to Volume Ratio (WVR)
9- Static Daylight Performance Metric
10- Parametric
11- Genetic Algorithm
12- Core to Floor Area
13- General Services Administration
14- Grasshopper Plugin
15- Rhinoceros
16- Radiance
17- Daysim
18- Honeybee Plugin
19- Ecotect
20- DesignBuilder
21- Galapagos
22- Usefull Daylight Illuminance (UDI)
23- Daylight Autonomy (DA)
24- Annual Sun Exposure (ASE)

۱۲- منابع فارسی و لاتین

• پور احمدی، محبوبه و خانمحمدی، محمد علی و مظفر، فرهنگ. ۱۳۹۸. بهینه سازی بازشوهای ساختمانی بر اساس عملکرد خیرگی در ساختمان های آموزشی اقلیم گرم و خشک ایران. معماری و شهرسازی پایدار، دوره ۷، ۱۱۳–۲۸.
https://doi.org/10.22061/jsaud.2019.4362.1302

• پور دیهیمی، شهرام و حاجی سید جواد، فریبرز. ۱۳۸۷. تأثیر نور روز بر انسان فرایند ادراکی و زیست‌شناسی – روانی روشنایی روز. صفه ۱۷، ۶۸–۷۵.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.16838710.1387.17.2.10.6

• زمردیان، زهرا سادات و حدادزادگان، هانی و تحصیلدوست، محمد. ۲۰۲۱. ارزیابی حساسیت متغیرهای معماری ساختمان‌های بلندمرتبه در عملکرد حرارتی و مصرف انرژی در اقلیم‌های گوناگون. معماری اقلیم گرم و خشک ۸: ۲۴۴–۶۳.
https://doi.org/10.29252/ahdc.2021.14249.1370

• شفوی مقدم، نسترن و زهرا سادات، زمردیان و تحصیلدوست، محمد. ۱۳۹۸. کارایی شاخص‌های نور روز در تخمین روشنایی کافی در فضا بر اساس ارزیابی کاربران نمونه موردی: فضاهای آموزشی دانشکده‌های معماری شهر تهران، *صفه* ۲۹ (۳): ۳۷–۵۶
https://doi.org/10.29252/soffeh.29.3.37

• فدایی اردستانی، محمدعلی و ناصری مبارکی، حیدر و آیت‌اللهی، محمدرضا و زمردیان، زهرا سادات. ۱۳۹۷. ارزیابی نور روز و خیرگی در کلاس‌های درس با استفاده از شاخص‌های پویا مطالعهٔ موردی: دانشکدهٔ معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی، *صفه* ۲۸ (۴): ۲۵–۴۰.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.16838710.1397.28.4.2.5.

• نصراللهی، فرشاد، ۱۳۹۰، ضوابط معماری و شهرسازی کاهش‌دهنده مصرف انرژی ساختمان‌ها، تهران: نشست کمیته ملی انرژی ایران

• Abanda, F. H., and L. Byers. 2016. "An Investigation of the Impact of Building Orientation on Energy Consumption in a Domestic Building Using Emerging BIM (Building Information Modelling)." *Energy* 97 (February): 517–27. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.135.

• Al horr, Yousef, Mohammed Arif, Martha Katafygiotou, Ahmed Mazroei, Amit Kaushik, and Esam Elsarrag. 2016. "Impact of Indoor Environmental Quality on Occupant Well-Being and Comfort: A Review of the Literature." *International Journal of Sustainable Built Environment* 5 (1): 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.03.006.

• Alghoul, Samah K., Hassan G. Rijabo, and Mohamed E. Mashena. 2017. "Energy Consumption in Buildings: A Correlation for the Influence of Window to Wall Ratio and Window Orientation in Tripoli, Libya." *Journal of Building Engineering* Complete (11): 82–86. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.04.003.

• Ali asghar Pilehvar. 2021. "Spatial-Geographical Analysis of Urbanization in Iran." *Humanities and Social Sciences Communications* 8 (1): 1–12. https://doi.org/10.1057/s41599-021-00741-w.

• Ardekani, Amirreza, I. Dabbaghchian, M. Alaghmandan, M. Golabchi, S. M. Hosseini, and S. R. Mirghaderi. 2020. "Parametric Design of Diagrid Tall Buildings Regarding Structural Efficiency." *Architectural Science Review* 63 (1): 87–102. https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1704395.

• Best, Raynor de. 2019. "Function of Tall Buildings Completed Worldwide 2019." https://www.statista.com/statistics/319930/tall-buildings-worldwide-by-function/.

• Chen, Xi, Hongxing Yang, and Yuanhao Wang. 2017. "Parametric Study of Passive Design Strategies for High-Rise Residential Buildings in Hot and Humid Climates: Miscellaneous Impact Factors." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (C): 442–60. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.055.

• Dubois, Marie-Claude, and Åke Blomsterberg. 2011. "Energy Saving Potential and Strategies for Electric Lighting in Future North European, Low Energy Office Buildings: A Literature Review." *Energy and Buildings* 43 (10): 2572–82. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.001.

• Edwards, L., and P. Torcellini. 2002. "Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants." http://dx.doi.org/10.2172/15000841.

• Fang, Yuan. 2017. "Optimization of Daylighting and Energy Performance Using Parametric Design, Simulation Modeling, and Genetic Algorithms." North Carolina State University. https://escholarship.org/uc/item/2zs2h81m.

• García, Arturo Ordoñez. 2016. "Effects of architectural design variables on energy and environmental performance of office buildings." Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universitat Rovira i Virgili. https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=114337.

• Heschong, Lisa, Mudit Saxena, seth wayland, and timothy perry. 2012. *DAYLIGHT METRICS REPORT for the CEC PIER Daylighting Plus Research Program*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33003.59689.

• Jalali, Zahra, Esmatullah Noorzai, and Shahin Heidari. 2020. "Design and Optimization of Form and Facade of an Office Building Using the Genetic Algorithm." *Science and Technology for the Built Environment* 26 (2): 128–40. https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1624095.

• Kahsay, Meseret T., Girma T. Bitsuamlak, and Fitsum Tariku. 2021. "Thermal Zoning and Window Optimization Framework for High-Rise Buildings." *Applied Energy* 292 (June): 116894. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116894.

• Kharvari, Farzam. 2020. "An Empirical Validation of Daylighting Tools: Assessing Radiance Parameters and Simulation Settings in Ladybug and Honeybee against Field Measurements." *Solar Energy* 207

Hojat Ghaedi. 2012. “The Role of Form Compositions in Energy Consumption of High-Rise Buildings (Case Study: Iran, Tehran).” *Advanced Materials Research* 488–489: 175–81. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.175.

- Mahdavinejad, Mohammad Javad, Soha Matoor, Neda Feyzmand, and Amene Doroodgar. 2012. “Horizontal Distribution of Illuminance with Reference to Window Wall Ratio (WWR) in Office Buildings in Hot and Dry Climate, Case of Iran, Tehran.” *Applied Mechanics and Materials* 110–116: 72–76. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.72.
- Mardaljevic, John. 1999. “Daylight Simulation.” In . De Montfort University.
- Mardaljevic, John, Lisa Heschong, and Eleanor Lee. 2009. “Daylight Metrics and Energy Savings.” *Lighting Research & Technology - LIGHTING RES TECHNOL* 41 (September): 261–83. https://doi.org/10.1177/1477153509339703.
- Marino, C., Antonino Nucara, and M. Pietrafesa. 2017. “Does Window-to-Wall Ratio Have a Significant Effect on the Energy Consumption of Buildings? A Parametric Analysis in Italian Climate Conditions.” https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2017.08.001.
- McNeil, Andy, and Eleanor Lee. 2012. “A Validation of the Radiance Three-Phase Simulation Method for Modelling Annual Daylight Performance of Optically Complex Fenestration Systems.” *Journal of Building Performance Simulation* 6 (January): 1–14. https://doi.org/10.1080/19401493.2012.671852.
- Mehdi Ghiai, Mohammad, Mojtaba Mahdavinia, Fariba Parvane, and Sorour Jafarikhah. 2014. “Relation between Energy Consumption and Window to Wall Ratio in High-Rise Office Buildings in Tehran.” *European Online Journal of Natural and Social Sciences* 3 (2): 366–75. https://european-science.com/eojnss/article/view/1423.
- Nabil, Azza, and John Mardaljevic. 2006. “Useful Daylight Illuminances: A Replacement for Daylight Factors.” *Energy and Buildings* 38 (7): 905–13. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013.

(September): 1021–36. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.054.

- Kheiri, Farshad. 2018. “A Review on Optimization Methods Applied in Energy-Efficient Building Geometry and Envelope Design.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92 (C): 897–920. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080.
- Ko, Dong-Hwan, Mahjoub Elnimeiri, and Raymond J. Clark. 2008. “Assessment and Prediction of Daylight Performance in High-Rise Office Buildings.” *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 17 (5): 953–76. https://doi.org/10.1002/tal.474.
- Krarti, M., P. M. Erickson, and T. C. Hillman. 2005. “A Simplified Method to Estimate Energy Savings of Artificial Lighting Use from Daylighting.” *Building and Environment* 40 (June). https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.007.
- Laouadi, Aziz, C. Reinhart, and Denis Bourgeois. 2008. “Efficient Calculation of Daylight Coefficients for Rooms with Dissimilar Complex Fenestration Systems.” *Journal of Building Performance Simulation* 1 (March). https://doi.org/10.1080/19401490701868299.
- Lee, Jaewook, Mohamed Boubekri, and Feng Liang. 2019. “Impact of Building Design Parameters on Daylighting Metrics Using an Analysis, Prediction, and Optimization Approach Based on Statistical Learning Technique.” *Sustainability* 11 (5): 1474. https://doi.org/10.3390/su11051474.
- Lee, Kyung Sun, Ki Jun Han, and Jae Wook Lee. 2016. “Feasibility Study on Parametric Optimization of Daylighting in Building Shading Design.” *Sustainability* 8 (12): 1220. https://doi.org/10.3390/su8121220.
- LEED. 2019. *LEED v4.1 BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION*. U.S. Green Building Council.
- Liu, Ligang, Borong Lin, and Bo Peng. 2020. “Correlation Analysis of Building Plane and Energy Consumption of High-Rise Office Building in Cold Zone of China.” *Building Simulation: An International Journal* 8 (5). https://doi.org/10.1007/s12273-015-0226-7.
- Mahdavinejad, Mohammad Javad, Mohammadhossein Ghasempourabadi, and

- Ourghi, Ramzi, Adnan Al-Anzi, and Moncef Krarti. 2007. "A Simplified Analysis Method to Predict the Impact of Shape on Annual Energy Use for Office Buildings." *Energy Conversion and Management* 48 (1): 300–305. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.04.011.
- Raji, Babak, Martin J. Tenpierik, and Andy Van den Dobbelsteen. 2017. "Early-Stage Design Considerations for the Energy-Efficiency of High-Rise Office Buildings." *Sustainability* 9 (4): 623. https://doi.org/10.3390/su9040623.
- Rao, S.P. 2015. "Impacts of Orientation on Daylighting in High-Rise Office Buildings in Malaysia." *Journal of Design and Built Environment Vol. 15 (2), December 2015* 15 (December): 29–38. https://myjurnal.mohe.gov.my/public/article-view.php?id=89102.
- Reinhart, C., and Jan Wienold. 2011. "The Daylighting Dashboard – A Simulation-Based Design Analysis for Daylit Spaces." *Building and Environment* 46 (February): 386–96. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001.
- Reinhart, Christoph F., John Mardaljevic, and Zack Rogers. 2006. "Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design." *LEUKOS* 3 (1): 7–31. https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001.
- Szolomicki, Jerzy, and Hanna Golasz-Szolomicka. 2019. "Technological Advances and Trends in Modern High-Rise Buildings." *Buildings* 9 (9): 193. https://doi.org/10.3390/buildings9090193.
- Turan, Irmak, Andrea Chegut, Daniel Fink, and Christoph Reinhart. 2020. "The Value of Daylight in Office Spaces." *Building and Environment* 168 (January): 106503. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106503.
- U.S.Genral services administration. 2019. "3.2 Space Planning | GSA." 2019. https://www.gsa.gov/system/files/GSA%20.FY%202019%20CJ.pdf

۱۳- چکیده تصویری