بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌های آموزشی
نمونهٔ موردی: دانشگاه شهید بهشتی

سیده‌مطهره احمدی سلیمانی[۱]
پگاه اشراقی[۲]
مائده‌سادات میردامادی[۳]
زهراسادات زمردیان[۴]
استادیار دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

دریافت: ۱۸ اسفند ۱۳۹۸
پذیرش: ۳۰ شهریور ۱۳۹۹
(صفحهٔ ۶۵- ۴۹)

کلیدواژگان: انرژی اولیه، ساعات عدم آسایش، ردپای کربن، بهینه‌سازی، دانشگاه.

چکیده
مطابق آمار، مؤسسات آموزشی بالاترین سطح مصرف انرژی را در ساختمان‌های دولتی دارند؛ بنابراین شناخت درست عملکرد مصرف انرژی ساختمان می‌تواند به استفاده از روش‌های درست بهینه‌سازی ساختمان کمک کند. در این تحقیق هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی در پنج دانشکدهٔ نوساز و قدیمی دانشگاه شهیدبهشتی است. برای پاسخ به پرسش‌های تحقیق، با استفاده از روش برداشت میدانی و شبیه‌سازی، وضعیت اولیهٔ هر دانشکده از نظر مصرف انرژی، ردپای کربن، و ساعات عدم آسایش بررسی شده است. سپس راهکارهای ساختمانی، معماری، تأسیساتی، و مدیریتی کاهش مصرف انرژی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر شبیه‌سازی و گزینه‌های بهینه در هر ساختمان معرفی شده است. درنهایت در این تحقیق راهکارها بر اساس هزینهٔ اجرا دسته‌بندی و برچسب انرژی هر دانشکده از نظر مصرف برق قبل و بعد از بهینه‌سازی بررسی شده است. با توجه به نتایج بهینه‌سازی مصرف انرژی مطابق راهکارهای عرضه‌شده در دانشکدهٔ الهیات و علوم زمین به‌ترتیب بیشترین برابر ۷۹٪ و کمترین برابر ۲۷٪ تأثیر را بر کاهش مصرف انرژی اولیه داشته‌اند. همچنین با استفاده از پنل‌های خورشیدی می‌توان بین ۸٪ (دانشکدهٔ زیست) تا ۶۵٪ (دانشکدهٔ الهیات) از نیاز برق دانشکده‌ها را تأمین کرد.

مقدمه
ایران از غنی‌ترین کشورهای جهان در زمینهٔ انرژی‌های فسیلی شناخته شده که با تولید ۲۱٪ و توزیع ۴۱٪ ذخایر گاز طبیعی مقام اول را در خاورمیانه کسب کرده است و به‌موازات آن نیز یکی از مصرف‌کنندگان بی‌رویهٔ انرژی قلمداد می‌شود. میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن مصرف‌کنندگان انرژی ساختمان‌ها، شامل خانگی، تجاری، و عمومی، برابر ۱۲۷میلیون تن در سال است که این میزان ۴/۵برابر مصرف دنیاست[۵]. بیش از یک‌سوم انرژی مصرفی مربوط به بخش ساختمان‌هاست که حدود ۷۰٪ آن مربوط به ساختمان‌های

۱. کارشناس ارشد معماری و انرژی، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی
ahmady.m93@gmail.com
۲. کارشناس ارشد معماری و انرژی، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی
p_eshraghi@sbu.ac.ir
۳. کارشناس ارشد معماری و انرژی، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی
m.mirdamadi@mail.sbu.ac.ir
۴. نویسندهٔ مسئول
z_zomorodian@sbu.ac.ir

دولتی است. بالاترین سطح مصرف انرژی در ساختمان‌های دولتی به مؤسسات آموزشی اختصاص یافته است، که این مصرف در ایالات متحده در محیط‌های آموزشی مقدار ۱۴٪، در اسپانیا ۴٪، و در اروپا ۱۰٪ گزارش شده است.[۶] مصرف انرژی ساختمان‌ها ارتباط مستقیمی با عمر ساختمان‌ها دارد و شناخت درست عملکرد مصرف انرژی ساختمان می‌تواند به استفاده از روش‌های درست بهینه‌سازی کمک کند.[۷] عمر ساختمان‌های آموزشی ساخته‌شده در سال‌های اخیر کمتر از ۳۰ سال است و به دلیل تیپولوژی، الگوی اشغال فضاها، و نوع کاربران، پتانسیل زیادی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش حرارتی دارند. طراحی معماری ساختمان‌ها تأثیر زیادی بر مصرف انرژی دارد و می‌توان با طراحی ساختمان‌های با مصرف انرژی کمْ وضعیت مصرف انرژی را در این ساختمان‌ها بهبود بخشید.[۸] بر اساس آمار سال ۱۳۹۵، درمجموع ۱۶۹ دانشگاه و مرکز آموزش عالی دولتی و وابسته به دستگاه‌های اجرایی وجود دارد.[۹] در تعرفهٔ برق مراکز آموزشی نیز پیش و پس از اجرای هدفمندسازی یارانه‌ها نازل‌ترین نرخ‌ها درج شده است و در زمان حاضر متوسط نرخ مراکز آموزشی کمتر از ۲۵٪ قیمت تمام‌شدهٔ برق در کشور است.[۱۰] بر اساس گزارش‌های موجود، علی‌رغم مصرف انرژی بالا در ساختمان‌های آموزشی، شرایط آسایش مطلوب نیست. ازآنجاکه کیفیت محیط داخلی به‌صورت مستقیم بر بهره‌وری و سلامت کاربران تأثیر می‌گذارد، بهینه‌سازی مصرف انرژی بدون در نظر گرفتن کیفیت محیط داخلی کارایی لازم را ندارد.[۱۱] تحقیقات مختلفی در مورد بهینه‌سازی مصرف انرژی در کشورهای متعدد انجام شده که نشان می‌دهند استفاده از راهکارهای بهینه‌سازی ۳۱٪ تا ۶۴٪ مصرف انرژی را کاهش داده است.

با توجه به حذف یارانه‌های انرژی در آیندهٔ نزدیک، بررسی مبحث بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها بیش از پیش ضروری می‌نماید. در این تحقیق بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی دانشگاه شهید بهشتی مطالعه شده است. به‌منظور پاسخ به پرسش‌های تحقیق، پنج دانشکده از پردیس اصلی دانشگاه شهید بهشتی انتخاب و وضعیت موجود آنها از منظر مصرف انرژی و شرایط آسایش بررسی شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی انرژی، راهکارهایی پیشنهاد و اثر هریک بر کاهش میزان مصرف انرژی، افزایش ساعات آسایش، و کاهش انتشار کربن برررسی شده است.

در این مقاله در بخش اول راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی و

پرسش‌های تحقیق

۱. آیا شرایط فعلی ساختمان‌های مورد بررسی در دانشگاه شهید بهشتی از منظر انرژی و آسایش منطبق بر استانداردهای ملی و بین المللی هستند؟

۲. کدام‌یک از راهکارهای کاهش مصرف انرژی بر اساس شاخص‌های اقتصادی، فنی، و آسایشی در دانشگاه شهید بهشتی اولویت دارند؟

۵. نک:
Y. Yousefi & S. Yousefi & Y. Yousefi, "Energy-efficiency in Educational Buildings in Iran: Analysis and Measures".

۶. نک:
M. Hu, "Optimal Renovation Strategies for Education Buildings — A Novel BIM – BPM – BEM Framework".

۷. نک:
M. Aksoezen, et al, "Building Age as an Indicator for Energy Consumption".

۸. نک: زهراسادات زمردیان و فرشاد نصراللهی و محمد علی‌آبادی، «کاهش مصرف انرژی در مدارس با طراحی بهینهٔ پنجره‌ها و سایبان‌ها؛ مطالعهٔ موردی: مدارس شیراز».

۹. نک:
https://madyar.org

۱۰. نک:
https://dolat.ir

۱۱. نک: عبدالحمید قنبران و محمدامین حسین‌پور، «بررسی عوامل مؤثر در بهره‌وری انرژی در فضاهای آموزشی در اقلیم شهر تهران».

شاخص‌های ارزیابی مرور گردیده و در بخش دوم فرایند انجام بهینه‌سازی بیان شده و در بخش سوم نتایجْ عرضه و جمع‌بندی گردیده است.

۱. مبانی تحقیق

در تحقیقات پیشین راهکارهای متعددی برای بهبود عملکرد ساختمان بر اساس اقلیم و سازه ساختمان بررسی و پیشنهاد شده است. مشخصات ساختمان مانند عمر ساختمان (نوساز، موجود، و یا تاریخی)، نوع کاربری (مانند مسکونی، تجاری، شهری، و زیربنایی)، و نوع مالکیت (شخصی، مجموعه مسکونی، اداری، و دانشگاهی) متفاوت و بر نحوهٔ نگهداری و بهسازی ساختمان مؤثر هستند[۱۲].

ابتدا راهکارهای بهینه‌سازی انرژی برای ساختمان‌های آموزشی در تهران بر اساس تحقیقات پیشین در ۵ بخش شامل معماری، ساخت، تأسیسات، مدیریت، و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی شده است. در گام بعد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و شاخص‌های بهینه‌سازی انرژی در سه دسته شاخص‌های زیست محیطی، آسایش، و اقتصادی بیان شده است.

۱. ۱. راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی

راهکارهای معماری: طراحی معماری ساختمان‌ها تأثیر زیادی بر مصرف انرژی دارد. نحوهٔ هم‌جواری فضاها، طراحی نما، درصد پنجره، و سایبان می‌توانند مصرف انرژی ساختمان را تحت تأثیر قرار دهند. در ساختمان‌های موجود اضافه کردن سایبان‌های مناسب می‌تواند در بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش آسایش کاربران تأثیر بسیاری بگذارد. سایبان‌ها، که به دو صورت داخلی و خارجی هستند، باید در تابستان از نفوذ حرارت جلوگیری کنند و نباید مانع ورود تابش در زمستان شوند. حقانی و همکاران به تأثیر سایبان‌های کرکره‌ای در کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری تهران پرداخته‌اند، نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که تأثیر استفاده از سایبان در سمت جنوب بیشتر از سایر جهات جغرافیایی بوده است[۱۳].

راهکارهای ساختمانی: پنجره‌ها، به‌منزلهٔ منابع اصلی اتلاف حرارت ساختمان، تأثیر زیادی بر احساس آسایش افراد (ریسک نفوذ هوا و اتلاف حرارت) و کیفیت و بهداشت هوای داخل (رطوبت و کپک) دارند. دو نوع راهکار برای بهبود عملکرد پنجره‌ها در نظر گرفته می‌شود: ۱) کنترل و کاهش مقدار هوای تعویض‌شده از طریق پنجره‌ها به کمک تعمیر و یا تعویض فریم پنجره‌های موجود و ۲) تعویض کل پنجره و استفاده از شیشه‌های دوجداره یا شیشه‌های با عبور نور انتخابی و شیشه‌های کم‌گسیل[۱۴]. در تحقیق فبریزیو و همکاران تعویض فریم پنجره و یا استفاده از شیشهٔ دوجداره به ترتیب باعث کاهش ۳۰–۴۰٪ و ۳۳٪ انرژی گرمایش در فصل زمستان شده است. روش دیگر برای کاهش مصرف انرژی ساختمان افزایش مقاومت حرارتی سقف و دیوارها بدون تغییر در ویژگی‌های معماری ساختمان است. در تحقیق فبریزیو با استفاده از عایق داخلی دیوارها ۷–۱۰٪ در مصرف انرژی گرمایشی ماهیانه در فصل سرد صرفه‌جویی شده است.[۱۵] درحالی‌که در بررسی تحصیلدوست و زمردیان استفاده از عایق حرارتی در دیوارهای دو مدرسه با مصالح متفاوت، موجب کاهش ۷٪ مصرف انرژی اولیهٔ سالیانه در یکی از مدارس و عدم تغییر در مصرف انرژی مدرسهٔ دیگر شده است. بهسازی عایق بام نیز از راهکارهای تأثیرگذار برای کاهش مصرف انرژی است. استفاده از عایق حرارتی در ساختمانی قدیمی و نوساز در تهران به‌ترتیب موجب کاهش ۱۰٪ و ۱۹٪ مصرف انرژی اولیهٔ سالیانه شده است.[۱۶] علاوه بر موارد فوق، هوابندی ساختمان نیز تأثیر قابل‌توجهی بر مصرف انرژی دارد. درصورتی‌که نرخ تعویض هوا بیش از حد باشد، موجب افزایش مصرف انرژی و اگر کمتر از حد استاندارد باشد، تنفس افراد موجب افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن هوا و

۱۲. نک:
S.A. Sharif & A. Hammad, "Simulation-Based Multi-Objective Optimization of Institutional Building Renovation Considering Energy Consumption, Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment".

۱۳. نک: معصومه حقانی و همکاران، «بررسی تأثیر سایه‌بان‌های کرکره‌ای در صرفه‌جویی مصرف انرژی ساختمان‌های اداری تهران».

14. Low-E

۱۵. نک:
F. Ascione, et al, "Energy Retrofit of an Educational Building in the Ancient Center of Benevento, Feasibility Study of Energy Savings and Respect of the Historical Value".

۱۶. نک:
M. Tahsildoost & ZS. Zomorodian, ". "Energy Retrofit Techniques : An Experimental Study of Two Typical School Buildings in Tehran".

کاهش کیفیت هوا می‌شود. میزان نرخ تعویض هوا بر اساس استاندارد اشری برای فضاهای آموزشی ۳ تا ۴ بار در هر ساعت است. که این میزان هوای تازه می‌تواند از طریق درزهای ساختمانی تأمین شود. ورود هوای ناخواسته[۱۷] همچنین موجب افزایش مصرف انرژی می‌گردد. مطابق تحقیق انجام‌شده در ایالات متحده بر روی ۲۵ ساختمان اداری، ۳۳٪ از مصرف کل گرمایش و ۳٫۳٪ از مصرف کل سرمایش به‌دلیل ورود هوای ناخواسته است[۱۸]. استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا در فضای داخلی نیز می‌تواند به کاهش بار سرمایش و گرمایش در ساختمان کمک کند. در این خصوص استفاده از مواد تغییرفازدهنده با گرمای نهان بالا یکی از شیوه‌های مناسب برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بخصوص انرژی خورشیدی است که تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از این مواد در تهران موجب شده مصرف انرژی تا ۱۱٫۴٪ کاهش یابد.[۱۹] همچنین استفاده این مواد همراه با تهویهٔ شبانه مصرف انرژی را ۴۷٪ نسبت به مدل پایه کاهش می‌دهد.[۲۰] خلاصه‌ای از راهکارها و شاخص‌های بهینه‌سازی در تحقیقات بهینه‌سازی مختلف در «جدول ۱» ارائه شده است. اجرای بام سبز در ساختمان‌های موجود نیز می‌تواند سبب کاهش انتقال حرارت از بام و کاهش مصرف انرژی شود. ذوالفقاری و همکاران به تأثیر بام سبز در کاهش مصرف انرژی در تبریز و تهران پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که ضخامت پوشش ۵ سانتی‌متری موجب ۱۴٪ کاهش در تبریز و ۲۸٪ کاهش مصرف انرژی در تهران می‌گردد[۲۱].

17. Infiltration

۱۸. نک:
S.T. Emmerich, et al, "Impact of Commercial Building Infiltration on Heating and Cooling Loads in US Office Buildings".

جدول ۱. تجربیات بهسازی عملکرد ساختمان‌های آموزشی از منظر انرژی و آسایش و تأثیر هریک از راهکارها بر پارامترهای بار،مصرف انرژی و تهویه، تدوین: نگارندگان.

منبع	اقلیم (کوپن گایگر)	زمینهٔ اقدام										زمینه‌های مورد بررسی				تأثیر بر مصرف انرژی
		انرژی‌های تجدیدپذیر	تعویض سیستم روشنایی	بازیافت گرما	تهویه طبیعی	تعویض سیستم تأسیسات	تعویض ست پوینت	PCM	عایق حرارتی	تعویض پنجره	کاهش تعویض هوا	کاهش هزینه	ساعات اسایش	CO_2	انرژی اولیه	
Ascione, et al, "Energy Retrofit of an Educational Building in the Ancient Center of Benevent".	Cfb ایتالیا						•	•	•	•	•	•	•	•	•	۳۱ تا ۳۸٪ کاهش مصرف انرژی اولیه
Niemelä, et al, "Cost-optimal Energy Performance Renovation Measures of Educational Buildings in Cold Climate".	Dfb فنلاند	•							•	•	•	•		•	•	۴۰٪ کاهش مصرف انرژی اولیهٔ سالیانه
Irulegi, et al, "Retrofit Strategies towards Net Zero Energy Educational Buildings".	Cfb اسپانیا			•	•				•	•	•		•		•	۵۸٪ کاهش مصرف انرژی
Hu, "Optimal Renovation Strategies for Education Buildings".	Cfa کلمبیا		•			•		•	•	•	•	•	•	•	•	۳۵ تا ۶۴٪ کاهش مصرف انرژی
Lee, et al, "Exploring the Effects of a Building Retrofit to Improve Energy Performance and Sustainability".	Cwa سئول								•	•		•			•	۳۸٪ کاهش مصرف انرژی گرمایشی
Tahsildoost & Zomorodian, "."Energy Retrofit Techniques : An Experimental Study of Two Typical School Buildings in Tehran".	Bsk ایران	•				•						•		•	•	۳۰٪ تا ۳۸٪ کاهش مصرف انرژی اولیه
Javid, et al, "Multi Objective Planning for Sustainable Retrofit of Educational Buildings Atiye".	Bsk ایران	•				•						•		•	•	کاهش انرژی الکتریسیته ۳٫۶٪ تا ۲۰٪
تأثیر هریک از راهکارها	کاهش بار گرمایشی	•				•	•	•	•	•	•					–
	کاهش بار سرمایشی		•		•	•	•	•	•	•	•					–
	کاهش مصرف برق	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•					–
	بهبود تهویه				•					•	•					–

راهکارهای تأسیساتی: با توجه به اینکه سیستم‌های تأسیساتی بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان را تأمین می‌کنند، استفاده از سیستم‌های مناسب با راندمان قابل‌قبول موجب افزایش آسایش کاربران و کاهش مصرف انرژی می‌گردد. جانشین کردن سیستم‌های قدیمی با سیستم‌های تأسیساتی جدید تأثیر زیادی بر مصرف انرژی می‌تواند داشته باشد، اما اقدامی پرهزینه است. در تحقیقی در مورد تأثیر سیستم‌های تأسیساتی در کاهش مصرف انرژی نشان داده‌اند که به‌ترتیب، با استفاده از اندازهٔ مناسب سیستم‌های تأسیساتی و منطقه‌بندی درست، مصرف انرژی سالانه ۲۳٪ و ۳۰٪ کاهش می‌یابد[۲۲]. ازآنجاکه امروزه عمده‌ترین سهم مصرف در شبکهٔ فشار ضعیف ناشی از سیستم‌های روشنایی است (که به این بخش حدود ۴۰٪ از میزان مصرف اختصاص دارد)، صرفه‌جویی در این قسمت تأثیر بیشتری در کاهش میزان بار شبکه خواهد داشت. با به‌کارگیری سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی در بخش سیستم‌های روشنایی ساختمان‌ها، می‌توان تا ۳۵٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد، که عملاً ۵۰٪ هزینه‌ها را کاهش می‌دهد[۲۳].

راهکارهای مدیریتی: به مدیریت مصرف انرژی از طریق تنظیم دمای سیستم‌های سرمایش و گرمایش نیز باید توجه شود. به‌روزسازی تجهیزات قدیمی و استفاده از ادوات کنترلی از راهکارهای مرسوم ولی پرهزینه هستند. اما کم‌هزینه‌ترین روشْ فرهنگ‌سازی بین مردم در راستای کاهش دما در زمستان و افزایش آن در تابستان است که مصرف انرژی را تا ۱۱٪ کاهش می‌دهد[۲۴].

انرژی‌های تجدیدپذیر: ساختمان‌های آموزشی، به‌دلیل سطح وسیعشان، پتانسیل زیادی برای تولید انرژی با استفاده از پنل‌های فتوولتاییک دارند. میزان تابش خورشیدی در ایران بین ۹۳۱۱ تا ۲۲۱۱ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال تخمین زده شده است و به‌طور متوسط سالانه بیش از ۳۰۰ روز آفتابی گزارش شده که بسیار قابل‌توجه است.[۲۵] با توجه به قیمت بالای خرید برق خورشیدی در مقایسه با تعرفهٔ برق ساختمان‌های آموزشی، تولید برق با استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک می‌تواند از نظر اقتصادی بسیار سودآور باشد. در کاشان عملکرد اقتصادی ۱۴ سیستم فوتولتاییک در ساختمان‌های آموزشی ارزیابی شده است و زمان بازگشت سرمایه بدون در نظر گرفتن یارانه‌ها ۱۰٫۵ الی ۱۲٫۳ سال برآورد شده است[۲۶]. علاوه بر این آب گرم مورد نیاز ساختمان‌های آموزشی با استفاده از آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی قابل‌تأمین است. نتایج تحقیق دیگری در اصفهان نشان می‌دهد که آب‌گرم‌کن خورشیدی قادر است تا ۱۰۰٪ نیاز مدرسه را در طول سال تأمین کند و با توجه به هزینه‌ها بازگشت سرمایه نیز ۳٫۱ سال تخمین زده شده است[۲۷].

۱. ۲. مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

در هر تصمیم‌گیری مجموعه‌ای گسترده از راه حل‌ها در دسترس است، و انتخاب بهترین راه حل همواره چالش بزرگی است. مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با هدف گرفتن چندین جنبه، به‌منظور فراهم آوردن یک پایهٔ فنی صحیح برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری است. به‌طور کلی با توجه به وجود متغیرهای متعدد هیچ راه حل منحصربه‌فردی وجود ندارد؛ بلکه مجموعه‌ای از راه حل‌های بهینه عرضه می‌گردد. این روش به‌طور گسترده برای تخصیص منابع انرژی و برنامه‌ریزی انرژی استفاده می‌شود. زمینه‌های کاربرد این روش برای سرمایه‌گذاری با سوددهی بیشتر، پروژه‌هایی با طول عمر بیشتر، اهداف متناقض برای تصمیم‌گیری و عدم قطعیت است. همچنین از این مدل برای مدیریت انرژی ساختمان استفاده می‌شود[۲۸]. در پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی ساختمان انتخاب مناسب‌ترین راهکار یا ترکیب راهکارها بسیار چالش‌برانگیز است. برای تصمیم‌گیری در انتخاب مناسب‌ترین راهکارها برای اعمال در پروژه‌های بهینه‌سازی لازم است تأثیر راهکارها از جنبه‌های مختلف هم‌زمان بررسی شوند.

۱۹. نک: بهرنگ سجادی و همکاران، «مطالعهٔ عددی تأثیر دمای ذوب بر کارایی مواد تغییر فاز دهنده در کاهش مصرف انرژی ساختمان».

۲۰. نک: ابراهیم سلگی و همکاران، «افزایش عملکرد تهویهٔ شبانه در ساختمان‌های اداری با استفاده از مواد تغییرفازدهنده؛ نمونهٔ موردی: شهر یزد».

۲۱. نک: علیرضا ذوالفقاری و همکاران، «ارزیابی تأثیر پوشش گیاهی بام سبز بر صرفه‌جویی انرژی ساختمان در دو اقلیم تهران و تبریز».

۲۲. نک:
I. Budaiwi & A. Abdou, "HVAC System Operational Strategies for Reduced Energy Consumption in Buildings with Intermittent Occupancy: The Case of Mosques".

۲۳. نک: مهرانگیز کاظمی و شهربانو ملک‌دار، «تأثیر سیستم‌های روشنایی خانه‌های هوشمند بر کاهش مصرف انرژی».

۲۴. نک: مهری جواهریان یزد و رضا جواهریان یزد، «تأثیر قابل‌توجه بهینه‌سازی ست پوینت تأسیسات سرمایشی و گرمایشی بر کاهش آلودگی هوا در مقایسه با سایر راهکارهای کاهش مصرف انرژی».

۲۵. نک:
https://satba.gov.ir

۲۶. نک:
S.S. Korsavi, et al, "Energy and Economic Performance of Rooftop PV Panels in the Hot and Dry Climate of Iran".

ازجمله تأثیرات زیست‌محیطی، اقتصادی، و آسایشی باید در نظر گرفته شوند. برای شاخص‌های زیست‌محیطی و آسایشی حدود قابل‌قبولی در استانداردهای ملی و بین‌المللی عرضه شده است. حدود قابل‌قبول شاخص‌های اقتصادی نیز بر اساس بودجهٔ سرمایه‌گذاری پروژه و سودآوری پروژه در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت تعیین می‌شود. در این بخش شاخص‌های مورد استفاده در پروژه‌های بهینه‌سازی معرفی شده است. لازم به ذکر است در پروژه‌های بهینه‌سازی معمولاً بر اساس اهداف پروژهْ یک، دو، یا سه شاخص هم‌زمان در نظر گرفته می‌شوند.

در انجام تحقیقی بر روی یک ساختمان آموزشی در شیراز راهکارهای معماری مختلف برای بهینه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر[۲۹] به کار گرفته شده است، نتایج حاکی از آن بوده که با بهینه کردن اجزای معماری ساختمان بدون تغییر در مصالحْ ۳۱٪ و با اعمال راهکارهای ساختمانی می‌توان تا ۴۰٪ انرژی اولیه را کاهش داد.[۳۰] همچنین نتایج بهینه‌سازی در یک ساختمان آموزشی در چین نشان می‌دهد که تا ۷۰/۷٪ می‌توان در مناطق سرد در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد.[۳۱] در مطالعاتی بر روی دانشگاه‌های مصر، با بهینه‌سازی عامل‌های طراحی در دیزاین بیلدر، کاهش ۲۶ تا ۳۱درصدی در انرژی سرمایش گزارش شده است[۳۲].

در تحقیق پیش رو بر اساس بستر تحقیق و شرایط ساختمان‌های مورد بررسی از میان راهکارهای معرفی‌شده تعدادی انتخاب و از میان اهداف بهینه‌سازی مختلف سه هدف انرژی، کربن، و ساعات آسایش با عنوان شاخص‌های بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. فرایند بهینه‌سازی در بخش بعد بیان شده است. شاخص‌های مورد بررسی در «جدول ۲» به‌طور خلاصه عرضه شده‌اند.

۲۷. نک: مهدی جهانگیری و همکاران، «امکان‌سنجی استفاده از آب‌گرم‌کن خورشیدی در فضاهای آموزشی اصفهان؛ نمونهٔ موردی: مدرسهٔ ابتدایی دخترانهٔ شاهد زرین‌شهر».

جدول ۲. شاخص‌های مورد استفاده در پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌های آموزشی مطابق تحقیقات پیشین، تدوین: نگارندگان.

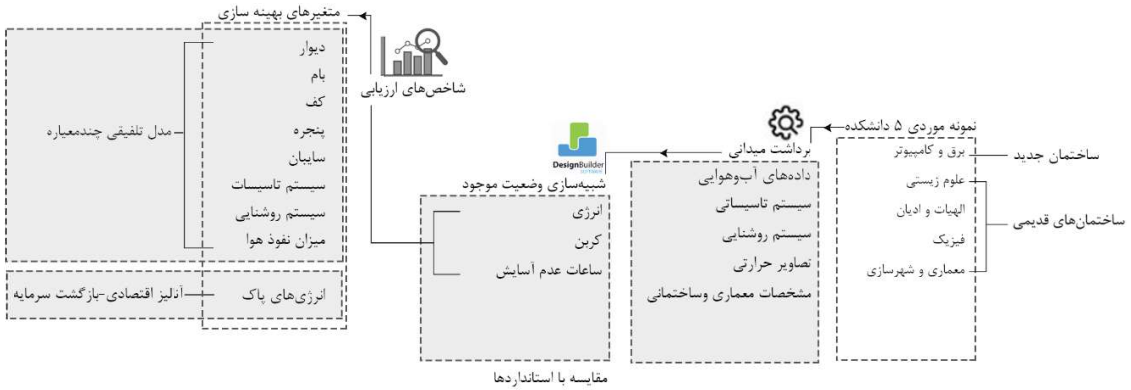
حوزه	شاخص	واحد	تعریف	حدود قابل‌قبول (بر اساس مأخذ)
زیست‌محیطی	EUI (Energy Use Intensity)	kWh/m^2	مجموع مصرف انرژی سرمایش، گرمایش، روشنایی، و تجهیزات به‌ازای هر متر مربع در یک سال	–
	PE (Primary Energy)	kWh/m^2	برای در نظر گرفتن تفاوت فرایند تولید انرژی ضرایبی بر مقادیر برق و گاز مصرفی اعمال می‌شود که در ایران برابر با ۳/۷ برای مصرف برق ۱/۱ برای مصرف گاز است.	حداکثر ۱۶۰ (دفتر مقررات ملی ساختمان. *مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، صرفه‌جویی در مصرف انرژی*)
	Carbon footprint	Kg	حاصل‌جمع میزان انتشار کربن ساختمان در طول دورهٔ عمر ساختمان (۳۰ تا ۵۰ سال) به‌اضافهٔ میزان کربن نهان	–
آسایشی	Discomfort hours	hours	تعداد ساعاتی که دما خارج از محدودهٔ آسایش باشد	محدودهٔ دمای آسایش: ۱۹ تا ۲۸ درجه سلسیوس ۳۰۰ ساعت حداکثر ساعات عدم آسایش (Ruya & Augenbroe, "Exploring "Thermal Comfort Acceptance Criteria in Energy Modeling")
	PMV	-	بر اساس یک مقیاس هفتگانه برای احساس حرارتی عرضه‌شده که بر مبنای تعادل حرارتی بدن است.	۰/۵- تا ۰/۵ (Parsons, Human Thermal Enviroments.)
	TA (Thermal autonomy)	%	آسایش حرارتی کاربران را در ارتباط با ویژگی‌های معماری و پوسته ساختمان نشان می‌دهد.	محدوده دمای آسایش :۱۹–۲۸ حداقل ۸۰٪ (Ko & Schiavon, "Balancing Thermal and Luminous "Autonomy in the Assessment of Building Performance")
اقتصادی	Payback period	year	از مقایسهٔ بین هزینه‌های بهسازی و قیمت صرفه‌جویی در حامل‌های انرژی محاسبه می‌گردد.	–
	NPV (Net Present Value)	-	تفاوت بین ارزش فعلی جریانات نقدی ورودی و ارزش فعلی جریان نقدی خروجی است.	–
	IRR (Internal Rate of Return)	%	میزان متوسط میزان بازده سالانه یک طرح تجاری است.	۲۰٪ (Edalati, et al, "Technical and Economic Assessments of Grid-connected Photovoltaic Power Plants: Iran Case Study")

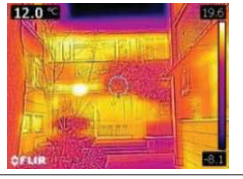
۲. روش‌شناسی

در این نوشتار مراحل انجام تحقیق به‌صورت گراف «ت ۱» است که شامل ۵ مرحله است: ۱) برداشت دانشکده‌ها و مدل‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، ۲) بررسی وضع موجود ساختمان‌ها و مقایسه با استانداردهای ملی و بین‌المللی، ۳) اعمال راهکارها، ۴) تحلیل حساسیت برای یافتن عوامل تأثیرگذار، و ۵) عرضهٔ مناسب‌ترین ترکیب در راستای اهداف بهینه‌سازی.

۲. ۱. بستر تحقیق

اقلیم: در این تحقیق پنج دانشکده در دانشگاه شهید بهشتی در منطقهٔ ولنجک تهران بررسی شده است. دانشگاه شهید بهشتی در شمال غرب تهران واقع شده است. شهر تهران در دسته‌بندی اقلیمی کوپن گایگر BSK (اقلیم نیمه‌بیابانی با دمای میانگین سالانهٔ کمتر از ۱۸ درجه) قرار دارد و روز درجهٔ سرمایشی سالیانه ۶۶۶ و روز درجهٔ گرمایشی سالیانه ۱۸۱۲٫۵ است. با مقایسهٔ داده‌های سازمان هواشناسی ایستگاه شمال تهران و ایستگاه مهرآباد، که اقلیم بخش‌های مرکزی شهر تهران است، درمی‌یابیم که دمای این منطقه، چه در میانگین و چه در حداکثر و حداقل، حدود ۲ درجه نسبت به شهر تهران خنک‌تر است. میانگین رطوبت در این منطقه در طول سال ۴۶٪ و در ایستگاه مهراباد ۴۱٪ است. از منظر شاخص بارندگی اختلاف بسیار بیشتری در این دو ایستگاه دیده می‌شود، به‌طوری‌که



دانشکدهٔ معماری و شهرسازی	دانشکدهٔ فیزیک	دانشکدهٔ الهیات و ادیان	دانشکدهٔ علوم زیستی	دانشکدهٔ برق و کامپیوتر
				

۲۸. نک:
S.D. Pohekar & M. Ramachandran, "Application of Multi-criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning - A Review".

29. Design Builder

۳۰. نک:
ZS. Zomorodian & F. Nasrollahi, "Architectural Design Optimization of School Buildings for Reduction of Energy Demand in Hot and Dry Climates of Iran".

ت ۱ (بالا). روند انجام تحقیق، طرح: نگارندگان.
ت ۲ (پایین). تصویر دانشکده‌های مورد بررسی و عکس‌های حرارتی در زمستان ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸، به کوشش نگارندگان.

مرکز تهران (ایستگاه مهرآباد) ۲۴۵ میلی‌متر و شمال تهران ۴۲۹ میلی‌متر سالانه بارندگی دریافت می‌کند.

نمونه‌های موردی: ساختمان‌های مورد بررسی را می‌توان به دو دسته ساختمان‌های قدیمی (بین ۴۰ تا۵۰ سال)، و ساختمان جدید (کمتر از ۱۰ سال) تقسیم کرد. مشخصات فیزیکی ساختمان‌ها شامل زیربنا، جهت‌گیری، نسبت سطح پنجره به دیوار و کف، نسبت سطح به حجم، و تعداد متصرفین در «جدول ۳» ارائه شده است. با توجه به «جدول ۳»، زیربنای ساختمان دانشکده‌های منتخب بین ۳۵۰۰ تا ۹۵۰۰ متر مربع، درصد پنجره‌ها نسبت به مساحت دیوار از ۲۰ تا ۶۰٪، و نسبت سطح به حجم بنا از ۰٫۳۵ تا ۰٫۶ برآورد شده است. سیستم سرمایش و گرمایش ساختمان‌های قدیمی کولر آبی و رادیاتور و در ساختمان جدید فن کویل است. فضاهای اصلی همهٔ ساختمان‌ها به‌صورت طبیعی تهویه می‌شوند و فاقد سیستم تهویهٔ مرکزی هستند.

تصاویر حرارتی دانشکده‌های علوم زیستی، فیزیک و برق ارائه‌شده در «ت ۲»، در زمستان ۱۳۹۶ و عکس حرارتی دانشکده‌های معماری و الهیات در پاییز سال ۱۳۹۸ عکس‌برداری شده است.

جدول ۳. مشخصات دانشکده‌های مورد بررسی، تدوین: نگارندگان.

کد	نام ساختمان	زیربنا (m^2)	درصد فضا٪					جهت گیری	نسبت پنجره به کف WFR	نسبت دیوار به پنجره WWR	نسبت سطح به حجم SVR	تعداد متصرف
			کلاس	اداری	آزمایشگاه/کارگاه	اشتراکی	سایر					
B01	علوم زیستی	۳۵۷۰	۱	۲۲	۱۸	۵۴	۵	SSE	٪۴۰	٪۶۰	۵۱٫۰	۶۱۴
B02	فیزیک	۳۹۶۷	۳	۳۰	۳۶	۲۴	۹	SSE	٪۲۴	٪۴۰	۳۷٫۰	۴۲۸
B03	الهیات و ادیان	۳۸۲۹	۱۲	۳۹	۰	۳۳	۱۶	SSE	٪۴۹	٪۲۲	۵۹٫۰	۱۸۴
B04	برق و کامپیوتر	۷۱۱۳	۹	۲۸	۱۱	۱۳	۳۹	SSE	٪۲۸	٪۳۳	۳۶٫۰	۲۱۵۴
B05	معماری و شهرسازی	۹۴۹۷	۱۳	۲۷	۱	۱۵	۴۴	SSE	٪۵۰	٪۳۷	۴۳٫۰	۸۴۰

۲. ۲. فرایند شبیه‌سازی

برای بررسی وضعیت موجود ساختمان‌ها از نظر مصرف انرژی و آسایش، ساختمان دانشکده‌ها با حداکثر شباهت با وضعیت موجود مدل‌سازی شده و عملکرد حرارتی آنها در نرم‌افزار دیزاین بیلدر شبیه‌سازی گردیده است. این نرم‌افزار تخصصی شبیه‌سازی انرژی است که از موتور مدل‌سازی انرژی پلاس[۳۳] استفاده می‌کند. مطابق نقشه‌های موجود و برداشت‌های میدانی، ۵ دانشکده در این نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. مفروضات شبیه‌سازی با توجه به برداشت‌های میدانی انجام گرفته است. ساختار پایهٔ اجزای ساختمان دانشکده‌ها به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شود، گروه اول برای دانشکدهٔ نوساز و گروه دوم برای دانشکده‌های قدیمی هستند. برنامهٔ زمانی حضور افراد و فعالیت‌ها نیز برای همهٔ دانشکده‌ها یکسان فرض شده است (۸ تا ۱۸ به‌استثنای فروردین و تابستان). نوع سیستم تأسیسات در دانشکدهٔ جدید مطابق با استانداردهای انرژی[۳۴] است که بازدهی سیستم‌ها را در حدود ۰٫۶۲ و در دانشکده‌های قدیمی سیستم تأسیسات با بهره‌وری انرژی کم[۳۵]با بازدهی در حدود ۰٫۴ فرض شده است. نقطهٔ تنظیم[۳۶] برای سیستم گرمایشی ۲۲ درجه و برای سیستم سرمایشی ۲۶ درجهٔ سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. ساختار اجزای دانشکده‌ها در حالت پایه به‌طور کامل در «جدول ۴» شرح داده شده است.

برای کاهش اتلاف حرارت از جداره‌های ساختمانْ ضریب انتقال حرارت آنها باید کمتر از مقادیر ذکرشده در استانداردها باشد. حداقل ضریب انتقال حرارت جداره‌های مختلف ساختمان در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ذکر شده است. در همهٔ ساختمان‌ها، به‌دلیل استفاده نکردن از عایق و پنجرهٔ دوجداره، ضریب انتقال حرارت دیوار و پنجره و سقف بیشتر از مقدار ذکرشده در مبحث ۱۹ است، به‌استثنای دانشکدهٔ برق و کامپیوتر که از گروه دانشکده‌های نوساز است و پنجره‌های آن دوجداره هستند.

۳۱. نک:
J. Zhao & Y. Du, "A Study on Energy-saving Technologies Optimization towards Nearly Zero Energy Educational Buildings in Four Major Climatic Regions of China".

۳۲. نک:
M.M. Samaan, et al, "Using Simulation Tools for Optimizing Cooling Loads and Daylighting Levels in Egyptian Campus Buildings".

33. energy plus
34. general energy code
35. low standard
36. set point

	ساختار اولیهٔ دیوار خارجی		ساختار اولیهٔ سقف خارجی		ساختار اولیهٔ شیشه پنجره		سیستم تأسیسات اولیه		نوع سیستم روشنایی اولیه	نفوذ هوای ناخواسته
کد ساختار	St1	St2	St3	St4	St5	St6	St7	St8	St9	St10
	دیوار آجری	بلوک بتنی سبک	سقف بتنی	بلوک بتنی سبک	شیشه تک‌جداره ۶ میلی‌متری	شیشه دوجداره ۳ میلی‌متر با ۶ میلی‌متر لایهٔ هوا	سیستم با بهره‌وری انرژی کم	سیستم مطابق با استاندارد انرژی	فلورسنت	کاهش نفوذ هوای ناخواسته (ACH)
U-Value ($W/m^2.K$)	۱٫۷	۰٫۸	۱٫۵	۰٫۸	۶٫۲۱	۳٫۱				
دانشکده‌های قدیمی	•		•		•		•		•	۵٫۱
دانشکدهٔ جدید		•		•		•		•	•	۱

جدول ۴ (بالا). مشخصات ساختارها در حالت پایه، تدوین: نگارندگان.

● ضریب انتقال حرارت مطابق با مقررات مبحث ۱۹

● ضریب انتقال حرارت بیشتر از مقدار توصیه شده در مقررات مبحث ۱۹

۲. ۳. راهکارهای بهینه‌سازی

بر اساس مرور ادبیات، تعدادی راهکار برای اعمال در ساختمان‌های قدیمی، نوساز، و بازسازی‌شده انتخاب و مدل‌سازی شده‌اند. ویژگی‌های راهکارهای انتخابی در «جدول ۵» بیان شده است. شاخص‌های زیست‌محیطی شامل انرژی اولیه، آسایشی شامل ساعات عدم آسایش، و اقتصادی شامل بازگشت سرمایه در فرایند بهینه‌سازی دانشکده‌ها در نظر گرفته شده است. هدفْ رسیدن به حداقل مصرف انرژی و حداقل ساعات عدم آسایش به‌صورت هم‌زمان است. با توجه به محدود بودن منابع مالی در بهسازی ساختمان‌ها، متخصصان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها را شاخص‌های اقتصادی می‌دانند. میزان هزینه برای عرضهٔ هرکدام از راهکارها باید به‌طور دقیق برآورد گردد، همچنین میزان اثرگذاری راهکار بر هدف‌های تعیین‌شده بررسی شود، تا بتوان راهکارهای اقتصادی با بیشترین اثرگذاری و کمترین زمان برگشت سرمایه را انتخاب کرد. تحلیل اقتصادی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر شامل هزینهٔ ساخت و ساز، هزینهٔ انرژی، و چرخهٔ عمر است[۳۷]. تحلیل و ارزیابی بر اساس مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار انجام شده است. ازآنجاکه در این تحقیق هدفْ مقایسهٔ بین راهکارها و اولویت‌بندی آنهاست، ارزیابی بر اساس قیمت‌های دقیق لازم نبوده است.

۵ دانشکده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر ابتدا در حالت پایه در «جدول ۴» مشخص گردیده و سپس هریک با ۱۳ استراتژی در «جدول ۵»، که مجموعاً ۷۰ مدل هستند، مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده‌اند.

۳۷. نک: "DesignBuilder Software Ltd - Home".

جدول ۵ (پایین). راهکارهایی برای بهبود عملکرد ساختمان دانشکده‌ها، تدوین: نگارندگان.

	دیوار خارجی		سقف خارجی		نوع شیشهٔ پنجره		نوع سایبان پنجره		نوع سیستم تأسیسات		نوع سیستم روشنایی		نفوذ هوای ناخواسته
کد ساختار	St11	St12	St13	St14	St15	St16	St17	St18	St19	St20	St21	St22	St23
راهکارهای عرضه‌شده	دیوار آجری با ۵ سانتی‌متر عایق پلی استایرن	دیوار آجری با ۱۰ سانتی‌متر عایق پلی استایرن	سقف بتنی با ۵ سانتی‌متر عایق پلی استایرن	سقف بتنی با ۱۰ سانتی‌متر عایق پلی استایرن	شیشه دوجداره ۶ میلی‌متر با ۱۳ میلی‌متر لایهٔ هوا	شیشه دو جداره کم‌گسیل ۶ میلی‌متر (۱۳ میلی‌متر هوا و e2=.1)	بدون سایبان	سایبان افقی با ضریب بازتاب نور زیاد(۸۰٪ ضریب بازتاب)	سیستم همرفتی با تهویهٔ طبیعی (Convector Heating, Electric, Nat Vent)	فن کویل چهارلوله‌ای با چیلر سرمایشی هوایی (FCU 4-pipe, Air-cooled Chiller)	LED	LED با سیستم کنترلی	کاهش نفوذ هوای ناخواسته (۰٫۵ تا ۱٫۵)
U-Value ($W/m^2.K$)	۰٫۵	۰٫۳	۰٫۵	۰٫۳	۲٫۶	۱٫۷							
دانشکده‌های قدیمی	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	۱
دانشکدهٔ نوساز			•	•			•	•			•	•	۰٫۵

تحلیل حساسیت: در تحلیل رفتار یک سیستم، تحلیل حساسیت به این معنا خواهد بود که محاسبه و برآورد کنیم خروجی پیش‌بینی‌شدهٔ ما برای سیستم تا چه حد به مقادیر متغیرهای مستقل و ورودی‌ها حساس است. به بیان دیگر، در یک شرایط مشخص و تعریف‌شده و با فرض ثابت بودن سایر متغیرها، اگر مقدار یک متغیر مستقل را تغییر دهیم، متغیر وابسته به آن چقدر تغییر خواهد کرد. تحلیل حساسیت هر پارامتر در هرکدام از دانشکده‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر با هدف یافتن بهینه‌ترین راهکارها برای کاهش مصرف انرژی، انتشار کربن، و ساعات عدم آسایش انجام شده است.

۳. نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های ۵ دانشکدهٔ علوم زیستی، فیزیک ، الهیات و ادیان، برق و کامپیوتر، و معماری واقع در پردیس مرکزی دانشگاه شهید بهشتی با مشخصات ذکرشده در حالت پایه در این بخش بیان شده است.

۳. ۱. نتایج حالت پایه

مصرف انرژی اولیه: در میان ساختمان‌های بررسی‌شده، تنها دانشکدهٔ برق و کامپیوتر نوساز است و سایر دانشکده‌ها قدیمی هستند. بیشترین میزان انرژی اولیه مربوط به دانشکدهٔ زیست و کمترین میزان انرژی اولیه مربوط به دانشکدهٔ برق و کامپیوتر، با اختلاف ۷۱٪ است. این اختلاف ناشی از تفاوت ساختارها و سیستم‌های تأسیساتی با راندمان بیشتر است. دانشکدهٔ برق با ساختار بلوک بتنی سبک (با ضریب انتقال حرارت ۰/۸ W/m^2K) و پنجرهٔ دوجداره (با ضریب انتقال حرارت ۳/۱ W/m^2K) و دانشکده‌های قدیمی با ساختار دیوار آجری (با ضریب انتقال حرارت ۱/۷ W/m^2K) و سقف بتنی (با ضریب انتقال حرارت ۱/۵ W/m^2K) و پنجرهٔ تک‌جداره (با ضریب انتقال حرارت ۶/۱ W/m^2K) هستند. میزان اتلاف انرژی از جداره‌ها در دانشکدهٔ برق نسبت به سایر دانشکده‌ها کمتر و بیشترین سهم اتلاف انرژی مربوط به جداره‌های نورگذر است. دانشکدهٔ زیست، به‌دلیل سطح زیاد جداره‌های نورگذر (WWR: ۶۰٪) با شیشهٔ تک‌جداره، دارای بیشترین میزان دریافت تابش خورشیدی و درنتیجه بیشترین بار سرمایشی و انرژی اولیه است. در دانشکدهٔ فیزیک، به‌دلیل کم بودن نسبت سطح به حجم (SVR: ۰/۳۷)، اتلاف حرارتی از طریق جداره‌ها نسبت به دانشکده‌های قدیمی کمتر است.

دانشکدهٔ معماری و شهرسازی نیز با اختلاف ۵۰٪ نسبت به دانشکدهٔ برق و کامپیوتر کمترین میزان مصرف در بین دانشکده‌های قدیمی را دارد. بیشترین دریافت و اتلاف انرژی در پنج دانشکده مربوط به تابش خورشید است که این مقدار در دانشکدهٔ زیست سهم بیشتری دارد. بعد از عامل تابش خورشید، در دانشکدهٔ زیست کف و روشنایی مصنوعی، در دانشکدهٔ فیزیک روشنایی مصنوعی و تهویه، در دانشکدهٔ الهیات کف و سقف و تهویه، در دانشکدهٔ برق تهویه و افراد، و درنهایت در دانشکدهٔ معماری کف و سقف و روشنایی مصنوعی از مهم‌ترین عوامل دریافت و اتلاف انرژی هستند.

ردهٔ مصرف انرژی: ردهٔ مصرف انرژی دانشکده‌های مورد بررسی با مقدار مبنای ساختمان‌های غیرمسکونی دولتی تعیین‌شده از سوی سازمان ملی استاندارد مقایسه گردیده و برچسب انرژی هر دانشکده در جدول ذکر شده است. چهار دانشکده برچسب انرژی دریافت نکرده‌اند و در دانشکدهٔ فیزیک نیز مصرف انرژی ۵برابر مقدار استاندارد است.

جدول ۶. مصرف انرژی در حالت پایه و ردهٔ مصرف انرژی، تدوین: نگارندگان.

دانشکده	مصرف برق (kWh/m^2)	مصرف گاز (kWh/m^2)	انرژی کل (kWh/m^2)	انرژی اولیه (kWh/m^2)	نوع ساختمان	ردهٔ مصرف انرژی
علوم زیستی	۳۳۰/۹۳	۱۱۳/۹۷	۲۵۷/۱۸	۱۳۴۹/۸	قدیمی	برچسب انرژی تعلق نمی‌گیرد
فیزیک	۱۵۸/۶	۲۹/۶	۱۸۸/۲	۸۴۹	قدیمی	برچسب انرژی تعلق نمی‌گیرد
الهیات	۲۶۵/۰۴	۲۱۹/۲	۲۵۶/۷۴	۱۱۲۲/۷۶	قدیمی	برچسب انرژی تعلق نمی‌گیرد
برق و کامپیوتر	۹۴/۱۱	۴۰	۲۵۳/۱۸	۳۹۲/۱۹	نوساز	F
معماری و شهرسازی	۱۵۴/۴۵	۱۴۹/۷۹	۳۰۴/۲۴	۷۳۶/۲۳	قدیمی	برچسب انرژی تعلق نمی‌گیرد

همان‌طور که در بخش یک شرح داده شد، با توجه به مصرف بالای انرژی در ساختمان‌های آموزشی، لزوم کاهش مصرف انرژی از اهداف مهم بهسازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی است. از شاخص‌های میزان مصرف انرژی می‌توان به ردهٔ مصرف انرژی برای ساختمان‌های غیرمسکونی، که توسط سازمان ملی استاندارد منتشر شده است، اشاره کرد. در این شاخص با توجه به اقلیم و میزان مصرف انرژی ساختمان به آن برچسب انرژی تعلق می‌گیرد. شاخص مصرف انرژی برای ساختمان‌های غیرمسکونی در تهران برابر با ۷۴ kWh/m2 در هر سال است. ردهٔ مصرف انرژی در ساختمان‌های غیرمسکونی مطابق با معیار استاندارد ایرانی تعریف‌شدهٔ مصرف انرژی در ساختان‌های غیرمسکونی تعیین می‌گردد[۳۸]. در «جدول ۶» نیز میزان مصارف به‌تفکیک برق و گازْ درج و ردهٔ مصرف انرژی ساختمان بیان شده است.

ساعات عدم آسایش: در بخش ساعات عدم آسایش، اختلاف میان بیشترین عدم آسایش مربوط به دانشکدهٔ معماری و شهرسازی با ۱۰۳۲ ساعت و کمترین مقدار متعلق به دانشکدهٔ برق و کامپیوتر با ۷۳۶ ساعت است.

ردپای کربن: با توجه به ارتباط مستقیم بین میزان انتشار کربن با کاهش مصرف انرژی، ترتیب ذکرشده به‌ترتیب انرژی اولیه است. اختلاف بین بیشترین و کمترین میزان ردپای کربن، که به‌ترتیب مربوط به دانشکدهٔ زیست و دانشکدهٔ نوساز برق و کامپیوتر است، ۴۷٪ است (ت ۳).

۳. ۲. تحلیل حساسیت راهکارها نسبت به مصرف انرژی اولیه

در مرحلهٔ اول برای بررسی میزان و نحوهٔ تأثیر پارامترهای ارائه‌شده (در جدول‌های ۴ و ۵) بر مصرف انرژی اولیه در دانشکده‌ها، تحلیل حساسیت انرژی اولیه نسبت به پارامترها با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام شده است.

پارامترهای تعریف‌شده در تحلیل حساسیتْ ساختارهای اولیه (جدول ۴) و استراتژی‌های بهینه‌سازی (جدول ۵) و تغییر نقطه‌های تنظیم آسایش است. در «ت ۴» حساسیت هریک از پارامترهای تعریف‌شده نسبت به مصرف انرژی اولیه در دو دانشکدهٔ زیست و معماری به‌طور نمونه عرضه شده است. در هر دو دانشکده بیشترین میزان حساسیت مصرف انرژی اولیه مربوط به سیستم تأسیسات ساختمان و پس از آن سیستم روشنایی بوده است.

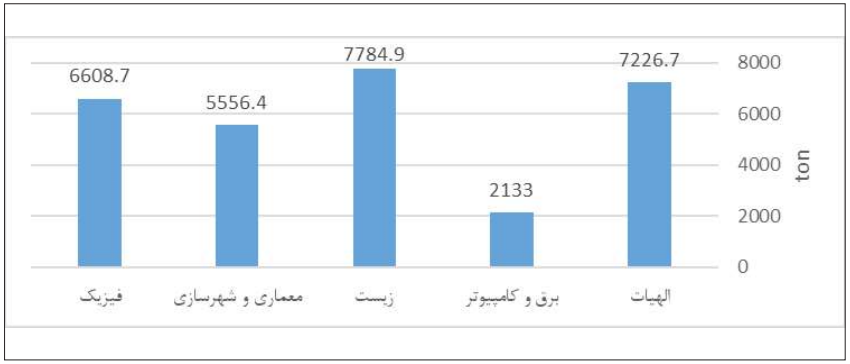
ترکیبات پیشنهادی و مصرف انرژی اولیه حاصل از آنها، استخراج‌شده از تحلیل حساسیت در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، در هر قسمت جداره‌ها، بام، نوع سیستم روشنایی، میزان نفوذ هوا، دمای سرمایش و گرمایش، سیستم تأسیسات، و سایبان در جدول‌های ۷ تا ۱۱ عرضه شده است.

در دانشکدهٔ زیست کمترین میزان انرژی اولیه در حالتی است که از عایق دیوار ۵ سانتی‌متری، عایق بام ۱۰ سانتی‌متری، شیشهٔ دوجداره با پوشش کم‌گسیل و سیستم روشنایی LED همراه با کنترلگر استفاده گردد و نیازی به استفاده از سایبان و تغییر سیستم مکانیکی حالت پایه نبوده است.

در دانشکدهٔ فیزیک کمترین میزان انرژی اولیه در حالتی است که از عایق دیوار ۵ سانتی‌متری، عایق بام ۱۰ سانتی‌متری، پنجرهٔ دوجداره با پوشش کم‌گسیل، سایبان و سیستم روشنایی

۳۸. نک: «تعیین معیار مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی».

ت ۳. ردپای کربن در حالت اولیه در دانشکده‌های مورد بررسی، طرح و تدوین: نگارندگان.



LED همراه با کنترلگر استفاده گردد و نیازی به تغییر سیستم مکانیکی حالت پایه نبوده است.

در دانشکدهٔ الهیات کمترین میزان انرژی اولیه در حالتی است که از عایق دیوار ۱۰ سانتی‌متری، عایق بام ۱۰ سانتی‌متری، پنجرهٔ دوجداره با پوشش کم‌گسیل، تغییر سیستم تأسیسات (فن کویل چهارلوله‌ای با چیلر هواخنک) و سیستم روشنایی LED همراه با کنترلگر استفاده گردد و نیازی به استفاده از سایبان نبوده است.

در دانشکدهٔ برق و کامپیوتر کمترین میزان انرژی اولیه در حالتی است که از عایق بام ۵ سانتی‌متری، سایبان، و سیستم روشنایی LED همراه با کنترلگر استفاده گردد.

در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی کمترین میزان انرژی اولیه در حالتی است که از عایق دیوار ۵ سانتی‌متری، عایق بام ۵ سانتی‌متری، پنجرهٔ دوجداره با پوشش کم‌گسیل، تغییر سیستم تأسیسات (فن کویل چهارلوله‌ای با چیلر هواخنک) و سیستم روشنایی LED همراه با کنترلگر استفاده گردد و نیازی به استفاده از سایبان نبوده است.

با توجه به تحلیل حساسیت انجام‌گرفته می‌توان به‌طور کلی نتیجه گرفت که تغییر سیستم روشنایی از حالت پایه به چراغ LED همراه با کنترلگر در همهٔ دانشکده‌ها با عنوان راهکار کاهش مصرف انرژی پیشنهاد شده است و پس از آن استفاده از عایق بام و عایق دیوار و استفاده از شیشهٔ دوجداره با پوشش کم‌گسیل به‌ترتیب پرتکرارترین راهکارها در کاهش مصرف انرژی هستند.

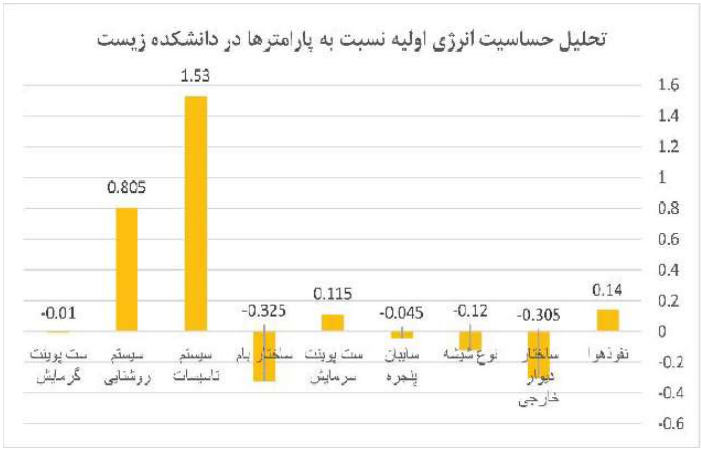
۳. ۳. بررسی نحوهٔ توزیع نتایج

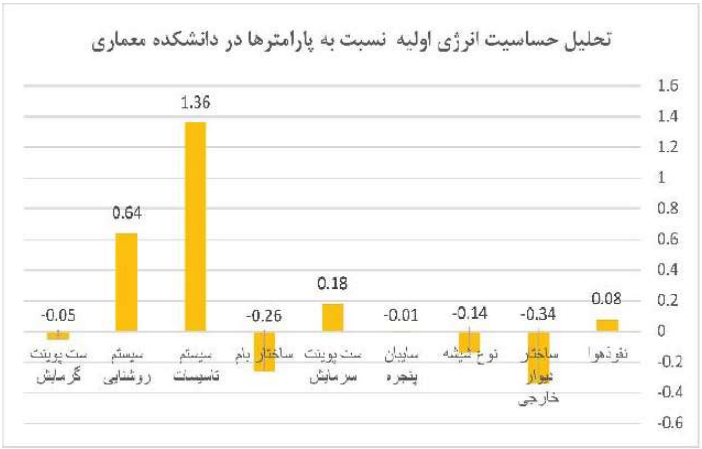
بر اساس تحلیل حساسیت انجام‌شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، اختلاف بین کمترین ساعت عدم آسایش و بیشترین ساعت عدم آسایش در دانشکدهٔ فیزیک ۲۴٪ ، در دانشکدهٔ زیست ۳۷٪، در دانشکدهٔ الهیات ۶۶٪ ، در دانشکدهٔ برق و کامپیوتر ۴۱٪ و در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی ۵۱٪ است. از منظر هزینه اختلاف بین کمترین قیمت و بیشترین قیمت در دانشکدهٔ فیزیک ۱۱٪ ، در دانشکدهٔ زیست ۹٪ ، در دانشکدهٔ الهیات ۸٪، در دانشکدهٔ برق و کامپیوتر ۲٪، و در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی ۱۴٪ است.

برای هر دسته راهکار انرژی اولیه، ردپای کربن، ساعات عدم آسایش، و هزینه محاسبه شده و ساعات عدم آسایش و هزینه در سه دسته قرار گرفته است. کمترین میزان مصرف انرژی اولیه (طبق جداول ۷ تا ۱۱) و شمارهٔ شبیه‌سازی[۳۹]، ساعات عدم آسایش، و هزینهٔ متناظر با هریک در «جدول ۱۲» ارائه شده است.

39. Iteration

ت ۴ (راست و چپ). تحلیل حساسیت انرژی اولیه نسبت به پارامترهای مختلف در دانشکده‌های زیست و معماری، طرح و بررسی: نگارندگان.





ردیف	انرژی اولیه (kWh/m²)	درصد تغییرات ست پوینت سرمایش نسبت به حالت اولیه	درصد تغییرات ست پوینت گرمایش نسبت به حالت اولیه	ساختارهای پیشنهادی	مقدار نفوذ هوا (ac/h)
۱	۲۳۶٫۰۱	۰	٪۰٫۱	St11, St14, St16, St7, St17, St22	۰٫۷۸
۲	۲۴۱٫۶۱	٪۲	٪۰٫۱	St12, St13, St16, St7, St18, St22	۱٫۰۴
۳	۲۵۲٫۱۰	٪۴	٪۰٫۱	St11, St13, St16, St7, St17, St22	۱٫۲۸
۴	۲۵۶٫۵۰	٪۲	٪۵	St1, St14, St16, St7, St17, St22	۱٫۰۳
۵	۲۵۹٫۰۰	٪۴	٪۲	St11, St13, St15, St7, St18, St22	۱٫۰۹

ردیف	انرژی اولیه (kWh/m²)	درصد تغییرات ست پوینت سرمایش نسبت به حالت اولیه	درصد تغییرات ست پوینت گرمایش نسبت به حالت اولیه	ساختارهای پیشنهادی	مقدار نفوذ هوا (ac/h)
۱	۱۳۳٫۱۳	٪۰٫۴	٪۲	St11, St14, St16, St7, St18, St22	۱٫۰۷
۲	۱۳۵٫۲۵	٪۱٫۵	٪۱	St11, St3, St16, St7, St18, St22	۱٫۰۳
۳	۱۳۵٫۷۰	٪۲	٪۴	St11, St3, St16, St7, St18, St22	۱٫۱۰
۴	۱۳۷٫۱۶	٪۲	٪۲	St11, St3, St16, St7, St17, St22	۱٫۰۳
۵	۱۳۹٫۲۱	٪۴	٪۷	St12, St3, St15, St7, St18, St22	۰٫۸۹

ردیف	انرژی اولیه (kWh/m²)	درصد تغییرات ست پوینت سرمایش نسبت به حالت اولیه	درصد تغییرات ست پوینت گرمایش نسبت به حالت اولیه	ساختارهای پیشنهادی	مقدار نفوذ هوا (ac/h)
۱	۱۹۴٫۲۷	-٪۴	٪۲٫۲	St12, St14, St16, St20, St17, St22	۱٫۱۳
۲	۱۹۵٫۷۴	٪۷٫۴	٪۳٫۸	St12, St13, St15,St20, St17, St22	۰٫۶۴
۳	۲۰۹٫۵۰	٪۴	-٪۱٫۶	St1, St14, St16, St20, St17, St22	۰٫۷۳
۴	۲۱۷٫۲۷	٪۶٫۱	٪۵	St12, St14, St16, St20, St17, St22	۱٫۲۲
۵	۲۲۰٫۹۷	-٪۴٫۲	٪۱٫۶	St11, St14, St15, St20, St17, St22	۰٫۹۴

ردیف	انرژی اولیه (kWh/m²)	درصد تغییرات ست پوینت سرمایش نسبت به حالت اولیه	درصد تغییرات ست پوینت گرمایش نسبت به حالت اولیه	ساختارهای پیشنهادی	مقدار نفوذ هوا (ac/h)
۱	۲۲۱	٪ ۵٫۲	٪۴٫۱	St13, St18, St22	۱
۲	۲۲۳٫۷	٪۵٫۵	٪۲٫۷	St14, St18, St22	۱٫۱
۳	۲۲۸٫۱	٪۱٫۸	٪۵٫۳	St14, St18, St22	۰٫۹
۴	۲۳۰٫۹	٪۷٫۴	-٪۱٫۱	St4, St17, St22	۱٫۲
۵	۲۳۱٫۱	٪۴٫۹	-٪۳	St14, St17, St22	۰٫۷

ردیف	انرژی اولیه (kWh/m²)	درصد تغییرات ست پوینت سرمایش نسبت به حالت اولیه	درصد تغییرات ست پوینت گرمایش نسبت به حالت اولیه	ساختارهای پیشنهادی	مقدار نفوذ هوا (ac/h)
۱	۱۴۴٫۹	٪۵	٪۱۱	St11, St13, St16,St17, St20, St22	۱
۲	۱۴۶٫۸	-٪۴	٪۱	St12, St14, St5, St17, St20, St22	۰٫۷۳
۳	۱۵۷٫۶	-٪۵	٪۱۳	St11, St3, St16, St17, St20, St22	۰٫۸۵
۴	۱۵۹٫۹	٪۲	٪۱	St1, St14, St16, St17, St20, St22	۰٫۹۶
۵	۱۶۱٫۳	٪۴	٪۱	St12, St13, St5, St17, St20, St22	۱

جدول ۷ (بالا، یک). راهکارهای بهینه در کاهش مصرف انرژی اولیه در دانشکدهٔ زیست، تدوین: نگارندگان.

جدول ۸. (بالا، دو) راهکارهای بهینه در کاهش مصرف انرژی اولیه در دانشکدهٔ فیزیک، تدوین: نگارندگان.

جدول ۹ (میان). راهکارهای بهینه در کاهش مصرف انرژی اولیه در دانشکدهٔ الهیات، تدوین: نگارندگان.

جدول ۱۰. راهکارهای بهینه در کاهش مصرف انرژی اولیه در دانشکدهٔ برق و کامپیوتر، تدوین: نگارندگان.

جدول ۱۱ (پایین). راهکارهای بهینه در کاهش مصرف انرژی اولیه در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، تدوین: نگارندگان.

بازهٔ تغییرات نتایج تحلیل حساسیت‌ها نسبت به مصرف انرژی اولیه، ردپای کربن، ساعات عدم آسایش، و هزینه در دانشکده‌ها متفاوت است. بیشترین بازهٔ تغییر در بخش انرژی اولیه مربوط به دانشکدهٔ الهیات و ادیان و سپس معماری و شهرسازی است که اختلاف میان حداکثر و حداقل انرژی اولیهٔ آنها به‌ترتیب برابر با مقادیر ۸۱۰ و ۴۹۰ کیلووات ساعت بر متر مربع هستند. در مقابل دانشکده‌های زیست، فیزیک، و برق و کامپیوتر نتایج همگن‌تری دارند و بازهٔ تغییر آنها به‌طور متوسط به ۱۹۸ کیلووات ساعت بر متر مربع محدود می‌شود.

در بخش ردپای کربن نیز دانشکده‌های زیست، معماری و شهرسازی، و الهیات و ادیان بیشترین بازهٔ تغییرات را داشته‌اند که این اختلاف در حدود ۱۵۰۰۰ تن کربن است. دو دانشکدهٔ برق و کامپیوتر و فیزیک از تغییر کمتری برخوردارند، که به‌ترتیب ۱۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ تن کربن است. در بخش ساعات عدم آسایش دانشکدهٔ معماری و شهرسازی و سپس الهیات و ادیان بیشترین تغییرات را به‌ترتیب با اختلاف ۹۰۵ و ۵۴۱ ساعت دارند. سه دانشکدهٔ برق و کامپیوتر، فیزیک، و زیست، با بازهٔ اختلاف حدود ۳۰۰ ساعت، کمترین تغییرات را نسبت به اعمال راهکارها داشته‌اند. درنهایت، در بخش هزینه‌ها، بیشترین تغییرات مربوط به دانشکدهٔ معماری و شهرسازی است که اختلاف حداقل و حداکثر برآورد قیمت‌ها نسبت به اعمال راهکارها برابر است با ۱میلیون دلار. سایر دانشکده‌ها با تغییر ۵۰۰هزار دلار دارای تغییر تقریباً یکسانی هستند.

	گزینه	انرژی اولیه (kWh/m^2)	کربن (تن)	عدم آسایش (ساعت)	هزینه (دلار آمریکا)
دانشکدهٔ علوم زیستی	۷۲	۲۳۶	۷۹۵۱٫۶	بازهٔ میانی	کم‌هزینه
	۶۸	۲۴۱٫۶	۸۰۵۵٫۲	بازهٔ میانی	کم‌هزینه
	۵۱	۲۵۲٫۱	۸۲۶۳٫۴	زیاد	کم‌هزینه
	۷۳	۲۵۶٫۵	۸۳۸۰٫۷	زیاد	کم‌هزینه
	۱۸	۲۵۹	۸۴۳۱٫۷	بازهٔ میانی	کم‌هزینه
دانشکدهٔ فیزیک	۵	۱۳۳٫۱	۵۶۸۸٫۶	کم	کم‌هزینه
	۳۵	۱۳۵٫۲	۵۷۴۰٫۴	کم	بازهٔ میانی
	۱۲	۱۳۵٫۶	۵۷۵۲٫۵	کم	پر هزینه
	۵۹	۱۳۷٫۱	۵۸۲۲٫۱	بازهٔ میانی	کم‌هزینه
	۳۰	۱۳۹٫۲	۵۸۳۰٫۱	بازهٔ میانی	بازهٔ میانی
دانشکدهٔ الهیات و ادیان	۳۳	۱۹۴٫۲	۷۲۴۵٫۵	بازهٔ میانی	پرهزینه
	۸۸	۱۹۵٫۷	۷۲۶۲	کم	پرهزینه
	۳۴	۲۰۹٫۵	۷۵۸۹٫۶	بازهٔ میانی	پرهزینه
	۵۲	۲۱۷٫۲	۷۷۰۲٫۴	بازهٔ میانی	پرهزینه
	۴۲	۲۲۰٫۹	۷۷۹۵٫۶	بازهٔ میانی	پرهزینه
دانشکدهٔ برق و کامپیوتر	۱۶	۲۲۱	۱۱۳۳۱٫۷	کم	پرهزینه
	۱۴	۲۲۳٫۷	۱۱۴۳۴٫۲	کم	پرهزینه
	۳۱	۲۲۸	۱۱۵۶۸٫۴	کم	پرهزینه
	۴۰	۲۳۰٫۹	۱۱۶۶۱٫۸	کم	بازهٔ میانی
	۱۵	۲۳۱	۱۱۶۴۶٫۷	کم	بازهٔ میانی
دانشکدهٔ معماری و شهرسازی	۶۵	۱۴۴٫۹	۱۲۷۶۳٫۷	کم	پرهزینه
	۴۶	۱۴۶٫۸	۱۲۷۸۰٫۴	کم	پرهزینه
	۶۶	۱۵۷٫۶	۱۳۳۷۲٫۲	بازهٔ میانی	پرهزینه
	۱۵	۱۵۹٫۹	۱۳۵۱۸٫۹	بازهٔ میانی	پرهزینه
	۳۷	۱۶۱٫۳	۱۳۴۸۴٫۱	کم	پرهزینه

جدول ۱۲. (راست) پنج گزینه کمترین مقدار انرژی اولیه و کربن و دسته‌بندی ساعات عدم آسایش و هزینهٔ متناظر با هریک، تدوین: نگارندگان.

۳. ۴. مقایسه با مدل اولیه

میزان مصرف انرژی اولیه، ساعت عدم آسایش، و میزان انتشار کربن بین مدل نهایی حاصل از بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت با مدل پایه بر اساس هریک از اهداف بهسازی ساختمان مقایسه شده است و برچسب انرژی برای هر دانشکده در «جدول ۱۳»

دانشکده	دانشکدهٔ زیست	دانشکدهٔ فیزیک	دانشکدهٔ الهیات و ادیان	دانشکدهٔ برق و کامپیوتر	دانشکدهٔ معماری و شهرسازی
ردهٔ مصرف انرژی	D	B	C	C	B

جدول ۱۳ (چپ). ردهٔ مصرف انرژی پس از بهینه‌سازی، تدوین: نگارندگان.

ذکر شده است. در «ت ۵ و ۶» انرژی اولیه و ساعت عدم آسایش مدل‌های پایه و بهینه در هر دانشکده با هم مقایسه شده‌اند.

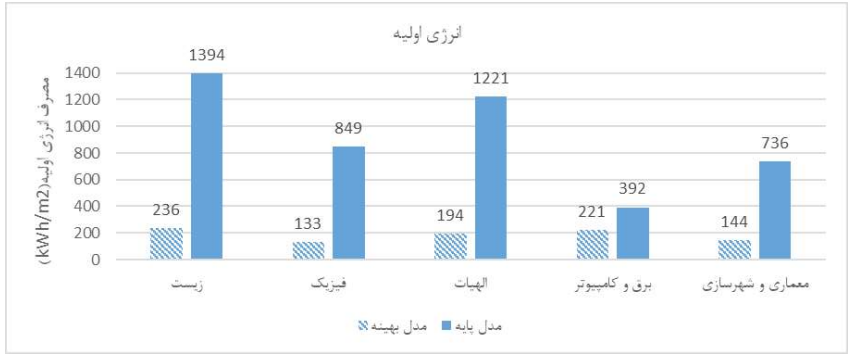
۳ . ۵. انرژی‌های پاک

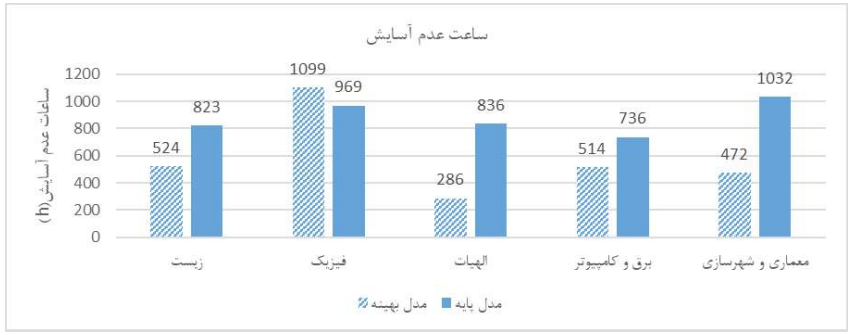
با توجه به محدودیت منابع فسیلی و افزایش تقاضا در بازار انرژی و نهایتاً ملاحظات زیست‌محیطی، بهره برداری از منابع تجدیدپذیر انرژی اجتناب‌ناپذیر است. نظر به موفقیت بسیار مناسب ایران در زمینهٔ برخورداری از منابع انرژی خورشیدی، ضرورت استفاده از حداکثر پتانسیل این منبع پایان‌ناپذیر بر کسی پوشیده نیست. استفاده از انرژی خورشیدی علاوه بر توجه به نکات زیست‌محیطی، می‌تواند سودآوری اقتصادی به‌همراه داشته باشد. درصورت فروش برق تولیدی، بر اساس نرخ عرضه‌شده از سوی سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق، برای پنل‌های خورشیدی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات ساعت، مقدار ۹۱۰۰ ریال نرخ پایه خرید تضمینی برق گزارش شده است. با در نظر گرفتن هزینهٔ اجرا و همچنین مقدار فروش برق تولیدی ناشی از منابع انرژی خورشیدی، می‌توان بازگشت سرمایه را محاسبه کرد. با توجه به قیمت عرضه‌شده در سال ۱۳۹۷ برای نصب و اجرای پنل‌های خورشیدی قیمت ۷۰میلیون ریال و در سال ۱۳۹۸ هزینهٔ آن ۸۰ الی ۱۰۰میلیون ریال خواهد بود. بنابر مصوبهٔ وزارت نیرو، برای محاسبهٔ هزینهٔ اجرای سلول‌های خورشیدی مبلغ ۱۰۰میلیون ریال فرض شده است.

با قرار دادن این پنل‌ها به مساحت ۴۰٪ از سطح بام هر دانشکده مقدار برق تولیدی سالانه توسط پنل‌ها با فرض راندمان ۴۰درصدی سیستم‌ها، مقدار صرفه‌جویی برق در بهینه‌ترین مقدار هر دانشکده، مقدار سودآوری ناشی از فروش برق تولیدی ، هزینهٔ اجرا، و سپس بازگشت سرمایه در «جدول ۱۴» قید شده است.

درصورت به‌فروش نرسیدن برق تولیدی، می‌توان با استفاده از پنل‌ها در دانشکدهٔ زیست ۸٪ ، فیزیک ۱۱٪ ، الهیات ۶۵٪، برق ۱۹٪، و معماری ۵۸٪ از نیاز به برق را تأمین کرد.

ازجمله محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به فقدان اطلاعات برای انجام ممیزی انرژی و تدقیق مدل‌های اولیه اشاره کرد. تحلیل اقتصادی راهکارهای مختلف دقیق نیست و برای اولویت‌بندی راهکارها، گزینه‌های مختلف از نظر اقتصادی





ت ۵ (بالا). مقایسهٔ انرژی اولیه مدل پایه و مدل بهینه در هر دانشکده، طرح و تدوین: نگارندگان.

دانشکده	برق تولیدی (kWh)	صرفه‌جویی برق (kWh)	سودآوری (میلیون ریال)	قیمت اجرا (میلیون ریال)	بازگشت‌سرمایه (سال)
زیست	۱۶۵۲۰	۲۱۳۴۰۵	۱۵۰	۱۸۰	۱٫۲
فیزیک	۱۴۱۹۰	۱۳۰۷۴۸	۱۲۹	۱۶۰	۱٫۲
الهیات	۸۹۰۵۰	۱۳۵۲۱۲	۸۱۰	۱۰۱	۱٫۲۴
برق و کامپیوتر	۱۰۵۴۹۲	۵۴۸۸۳۹	۹۵۹	۱۲۰	۱٫۳
معماری و شهرسازی	۱۴۹۰۳۴	۲۵۸۷۷۶	۱۳۶	۱۷۰	۱٫۳

ت ۶ (میان). مقایسه ساعات عدم آسایش مدل پایه و مدل بهینه در هر دانشکده، طرح و تدوین: نگارندگان.

جدول ۱۴ (پایین). بررسی زمان بازگشت سرمایهٔ حاصل از نصب سلول فتوولتاییک، بررسی و تدوین: نگارندگان.

با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همچنین این تحقیق در تعداد محدود و برای ۵ دانشکدهٔ دانشگاه شهید بهشتی انجام شده است و بنابراین سیاست کلی برای بهسازی دانشکده‌ها عرضه نمی‌شود.

۴. جمع‌بندی

با توجه به موضوعات مورد بررسی در این نوشتار، می‌توان گفت عدم آسایش در دانشکده‌های دانشگاه شهید بهشتی، به‌دلیل وجود ساختمان و سیستم‌های قدیمی، جدی ارزیابی شده است. از سوی دیگر، بهسازی ساختمان‌ها ما را به تحقق اهداف دانشگاه سبز نزدیک‌تر می‌کند و با توجه به حذف یارانه‌ها علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، سودآوری اقتصادی نیز به‌همراه دارد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در ۵ دانشکده، ساختارهایی یکسان در جهت بهبود سه پارامتر انرژی اولیه، ساعات عدم آسایش، و ردپای کربن پیشنهاد شد و بهترین راهکارها در هر دانشکده مشخص گردید. با توجه به تحلیل و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در هر دانشکده و میزان تأثیر اعمال راهکارها بر هریک از موارد، به نظر می رسد که دانشکدهٔ الهیات بهترین نتایج را در موضوعات ذکرشده دارد و آخرین اولویت در زمینهٔ بهبود به دانشکدهٔ علوم زمین دیده می‌شود؛ چراکه با ساختارهای پیشنهادی در دانشکدهٔ الهیات و ادیان می‌توان میزان مصرف انرژی اولیه را ۷۹٪ و ردپای کربن را ۶۷٪ و ساعات عدم آسایش را ۶۹٪ کاهش داد؛ درحالی‌که این نتایج برای دانشکدهٔ علوم زمین به‌ترتیب برابر با ۲۷٪، ۲۵٪، و ۳۱٪ است.

منابع و مآخذ

«پتانسیل تابش و نقشهٔ تابش خورشید در ایران». در وبگاه سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر https://satba.gov.ir

«تعیین معیار مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی». در وبگاه https://isri.gov.ir

جواهریان یزد، مهری و رضا جواهریان یزد. «تأثیر قابل‌توجه بهینه‌سازی ست پوینت تأسیسات سرمایشی و گرمایشی بر کاهش آلودگی هوا در مقایسه با سایر راهکارهای کاهش مصرف انرژی». در *هشتمین همایش بین‌المللی اجلاس آسیایی جامعهٔ ایمن*، ۱۳۹۵ش، ص ۱–۵.

جهانگیری، مهدی و رعنا عبداللهی و مهدی محمدی. «امکان‌سنجی استفاده از آب‌گرم‌کن خورشیدی در فضاهای آموزشی اصفهان؛ نمونهٔ موردی: مدرسهٔ ابتدایی دخترانهٔ شاهد زرین‌شهر». در *سومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری*، ۱۳۹۵.

حقانی، معصومه و بهروز محمدکاری و ریما فیاض. «بررسی تأثیر سایه‌بان‌های کرکره‌ای در صرفه‌جویی مصرف انرژی ساختمان‌های اداری تهران». در *مهندس مکانیک مدرس*، دورهٔ ۱۷، ش ۴ (تیرماه ۱۳۹۶)، ص ۱۷–۲۸.

دفتر مقررات ملی ساختمان. مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، صرفه‌جویی در *مصرف انرژی*، ۱۳۸۹.

ذوالفقاری، علیرضا و محسن طالبی و سیدمهدی قادری. «ارزیابی تأثیر پوشش گیاهی بام سبز بر صرفه‌جویی انرژی ساختمان در دو اقلیم تهران و تبریز». در *سومین همایش ملی اقلیم، ساختمان و بهینه‌سازی مصرف انرژی با رویکرد توسعهٔ پایدار*، ۱۳۹۴.

زمردیان، زهراسادات و فرشاد نصراللهی و محمد علی‌آبادی. «کاهش مصرف انرژی در مدارس با طراحی بهینهٔ پنجره‌ها و سایبان‌ها؛ مطالعهٔ موردی: مدارس شیراز». در *دومین همایش ملی اقلیم، ساختمان و بهینه‌سازی مصرف انرژی*، ۱۳۹۲.

سجادی، بهرنگ و محمد یوسفی‌پور و محمدعلی اخوان بهابادی و صادق خداویسی. «مطالعهٔ عددی تأثیر دمای ذوب بر کارایی مواد تغییرفازدهنده در کاهش مصرف انرژی ساختمان». در *دوفصلنامهٔ مباحث برگزیده در انرژی*، دورهٔ ۲، ش ۲ (۱۳۹۵).

سلگی، ابراهیم و بهروز محمدکاری و ریما فیاض و بهشید حسینی و هلیا طاهری. «افزایش عملکرد تهویهٔ شبانه در ساختمان‌های اداری با استفاده از مواد تغییرفازدهنده؛ نمونهٔ موردی: شهر یزد». در *معماری و شهرسازی آرمان شهر*، ش ۱۷ (پاییز و زمستان ۱۳۹۵)، ص ۵۳–۶۲.

قنبران، عبدالحمید و محمدامین حسین‌پور. «بررسی عوامل مؤثر در

بهره‌وری انرژی در فضاهای آموزشی در اقلیم شهر تهران». در *نقش جهان*، دورهٔ ۶، ش ۳ (پاییز ۱۳۹۵)، ص ۵۱–۶۲.

کاظمی، مهرانگیز و شهربانو ملک‌دار. «تأثیر سیستم‌های روشنایی خانه‌های هوشمند بر کاهش مصرف انرژی». در *کنفرانس ملی بهینه‌سازی مصرف انرژی در علوم و مهندسی*، ۱۳۹۳، ص ۱–۱۰.

"DesignBuilder Software Ltd - Home", 2017. [Online]. Available at: https://designbuilder.co.uk//

Aksoezen, M & M. Daniel & U. Hassler & N. Kohler. "Building Age as an Indicator for *Energy Consumption*", in Energy Build, Vol. 87 (2015), pp. 74-86.

Ascione, F. & N. Bianco & R. Francesca & D. Masi & F. De Rossi & G. Peter. "Energy Retrofit of an Educational Building in the Ancient Center of Benevento, Feasibility Study of Energy Savings and Respect of the Historical Value", in *Energy & Buildings*, Vol. 95 (2015), pp. 172-183.

Budaiwi, I. & A. Abdou. "HVAC System Operational Strategies for Reduced Energy Consumption in Buildings with Intermittent Occupancy: The Case of Mosques", *in Energy Convers. Manag.*, Vol. 73 (2013), pp. 37-50.

Edalati, S. & M. Ameri & M. Iranmanesh & H. Tarmahi & M. Gholampour. "Technical and Economic Assessments of Grid-connected Photovoltaic Power Plants: Iran Case Study", in Energy, Vol. 114 (2016), pp. 923-934.

Emmerich, S.T. & A.K. Persily & T.P. McDowell. "Impact of Commercial Building Infiltration on Heating and Cooling Loads in US Office Buildings", in *26th AIVC Conf. Ventilation Relat. to Energy Perform. Build.*, No. 1998 (2005).

Hu, M. "Optimal Renovation Strategies for Education Buildings — A Novel BIM – BPM – BEM Framework", in *Sustainability*, 2018, pp. 1-22.

Irulegi, O & A. Serra & J. M. Salmerón & R. Vega. "Retrofit Strategies towards Net Zero Energy Educational Buildings: A Case Study at the University of the Basque", in *Energy Build.*, 2017.

Javid, A. Soleimani & F. Aramoun & M. Bararzadeh & A. Avami. "Multi Objective Planning for Sustainable Retrofit of Educational Buildings Atiye", in *J. Build. Eng.*, 2019, p. 100759.

Ko, W.H & S. Schiavon. "Balancing Thermal and Luminous Autonomy in the Assessment of Building Performance", in *Building Simulation*, 2017, pp. 1966-1973.

Korsavi, S.S. & Z.S. Zomorodian & M. Tahsildoost. "Energy and Economic Performance of Rooftop PV Panels in the Hot and Dry Climate of Iran", in *J. Clean. Prod.*, Vol. 174 (2018), pp. 1204-1214.

Lee, J. & M. Mccuskey & J. Choi. "Exploring the Effects of a Building Retrofit to Improve Energy Performance and Sustainability : A Case Study of Korean Public Buildings", in *Journal of Building Engineering*, Vol. 25, No. April, 2019.

Niemelä, T. & R. Kosonen & J. Jokisalo. "Cost-optimal Energy Performance Renovation Measures of Educational Buildings in Cold Climate", in *Applied Energy*, 183 (1) (2016), pp. 1005-1020.

Parsons, Ken. *Human Thermal Enviroments*, Boca Raton, 2014.

Pohekar, S.D & M. Ramachandran. "Application of Multi-criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning - A Review", in *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 8, No. 4 (2004), pp. 365-381.

Ruya, E. & G. Augenbroe. "Exploring Thermal Comfort Acceptance Criteria in Energy Modeling", in *Building Performance Analysis Conference and SimBuild Co-organized by ASHRAE and IBPSA-USA Chicago, I*L, 2018, pp. 258-265.

Samaan, M.M & O. Farag & M. Khalil. "Using Simulation Tools for Optimizing Cooling Loads and Daylighting Levels in Egyptian Campus Buildings", in *HBRC J.*, Vol. 14, No. 1 (2018), pp. 79-92.

Sharif, S.A. & A. Hammad. "Simulation-Based Multi-Objective Optimization of Institutional Building Renovation Considering Energy Consumption, Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment", *J. Build. Eng.*, Vol. 21, No. June 2018 (2019), pp. 429-445.

Tahsildoost, M. & ZS. Zomorodian. "Energy Retrofit Techniques : An Experimental Study of Two Typical School Buildings in Tehran", in *Energy Build.*, Vol. 104 (2015), pp. 65-72.

Yousefi, Y. & S. Yousefi & Y. Yousefi. "Energy-efficiency in Educational Buildings in Iran: Analysis and Measures", in *Building Simulation Conference*, 2015, pp. 169-174.

Zhao, J & Y. Du. "A Study on Energy-saving Technologies Optimization towards Nearly Zero Energy Educational Buildings in Four Major Climatic Regions of China", in *Energies*, Vol. 12, No. 24, 2019.

Zomorodian, ZS. & F. Nasrollahi. "Architectural Design Optimization of School Buildings for Reduction of Energy Demand in Hot and Dry Climates of Iran", in *Int. J. Archit. Urban Plann.*, 23(1) (2013), pp. 41-50.

http://dolat.ir پایگاه اطلاع‌رسانی دولت (دستیابی در تاریخ ۱۳ تیر ۱۳۹۰)

https://madyar.org سامانهٔ هوشمند مدارس مدیار