نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۲(۱۴۲)، ۴۱-۵۶ / فروردین ۱۴۰۴
DOI:10.22034/BAGH.2025.490974.5717

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
A Systematic Bibliometric Analysis of Energy Optimization Methods in Buildings
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

ارزیابی سیستماتیک علم‌سنجی در روش‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان*

پریسا جاوید[۱]، نیلوفر نیک‌قدم[۲]**، علیرضا کریم‌پور[۳]، ژاله صابرنژاد[۴]

۱. گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲. گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳. گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۴. گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

چکیده

بیان‌مسئله: با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و ضرورت کاهش مصرف انرژی، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای بهبود عملکرد ساختمان‌ها گسترش یافته است. ازآنجاکه ساختمان‌ها یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای هستند، ارتقای بهره‌وری انرژی در آن‌ها تأثیر زیادی در کاهش آلاینده‌ها و هزینه‌ها دارد. این پژوهش با بررسی روش‌های بهینه‌سازی مختلف، ازجمله الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، به تحلیل روندها و شناسایی روش‌های مؤثر در بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها می‌پردازد و به‌دنبال پاسخ به این پرسش است که کدام یک از روش‌های بهینه‌سازی، نقش مؤثرتری در شبیه‌سازی انرژی ساختمان‌ها دارند و توزیع و روند استفاده از این روش‌ها در پژوهش‌های علمی چگونه است؟

هدف پژوهش: این پژوهش در پی شناسایی و تحلیل روش‌های بهینه‌سازی پرکاربرد و مؤثر در بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌هاست و توزیع و میزان استفاده از این روش‌ها را در مقالات علمی بررسی کرده و به‌دنبال شناسایی روندهای موجود و سهم هر روش در بهینه‌سازی مصرف انرژی و دیگر جنبه‌های عملکردی ساختمان‌هاست.

روش پژوهش: در چهارچوب مرور سیستماتیک و با هدف شناسایی دقیق روش‌های بهینه‌سازی در حوزهٔ انرژی ساختمان‌ها، ابتدا جست‌وجوی هدفمند در پایگاه‌های دادهٔ معتبر داخلی و خارجی با استفاده از کلمات کلیدی مرتبط انجام شد. پس از مرحلهٔ پالایش اولیه و انتخاب منابع مرتبط، تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار VOS Viewer و بیبلومتریک برای استخراج ارتباطات میان متون علمی صورت گرفت. سپس، با بهره‌گیری از تحلیل مضمون مدل مفهومی از روش‌های بهینه‌سازی مؤثر در بهبود عملکرد ساختمان‌ها تدوین شد تا به درکی جامع از کاربرد و تأثیر این روش‌ها دست یابد.

نتیجه‌گیری: روش‌های بهینه‌سازی، به‌ویژه الگوریتم‌های ژنتیک و هوش ازدحامی، نقشی حیاتی در ارتقای عملکرد انرژی ساختمان‌ها دارند و با تحلیل جامع روندهای موجود، بر لزوم ادغام داده‌های واقعی و تکنیک‌های هوشمند برای توسعهٔ راه‌حل‌های کارآمدتر تأکید می‌شود.

واژگان کلیدی: *بهینه‌سازی انرژی، الگوریتم‌های ژنتیک، علم‌سنجی، بهره‌وری انرژی، مصرف انرژی در ساختمان‌ها.*

مقدمه

با افزایش نگرانی‌های جهانی پیرامون تغییرات اقلیمی و بحران انرژی، بهینه‌سازی[۱] مصرف انرژی در ساختمان‌ها به یکی از اولویت‌های اصلی در حوزهٔ مهندسی و مدیریت انرژی تبدیل شده است (Mathebula et al., 2024) ساختمان‌ها، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در سطح جهان، سهم بسزایی در تولید گازهای گلخانه‌ای دارند و بهینه‌سازی مصرف انرژی در آن‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی کمک کند (da Silva et al., 2024). روش‌های بهینه‌سازی

*این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری «پریسا جاوید» باعنوان «تبیین جانمایی و هندسهٔ بهینهٔ آتریوم به‌منظور ارتقای آسایش حرارتی در ساختمان‌های اداری در دو اقلیم سرد و خشک و گرم و خشک (شهرهای تبریز و یزد)» است که به راهنمایی دکتر «نیلوفر نیکقدم» و دکتر «علیرضا کریم‌پور» و مشاورهٔ دکتر «ژاله صابرنژاد» در سال ۱۴۰۳ در گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی انجام شده است.

** نویسندهٔ مسئول: ۰۲۱۶۶۴۱۸۳۳۰، n_nikghadam@iau.ir

مختلف، ازجمله الگوریتم‌های ژنتیک[۲] (Ogar et al., 2023)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۳] (da Silva et al., 2024) و روش‌های هیبریدی[۴] (Gonidakis et al., 2024)، به‌طور گسترده‌ای برای بهبود عملکرد ساختمان‌ها در زمینه‌های مختلف، از طراحی تا بهره‌برداری، استفاده شده است (Najafi et al., 2023). این روش‌ها به محققان و طراحان امکان می‌دهند تا به‌صورت مؤثرتری به مدیریت انرژی و ارتقای بهره‌وری در ساختمان‌ها بپردازند. از سوی دیگر، تنوع روش‌های بهینه‌سازی و پیچیدگی‌های مربوط به کاربرد آن‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و عملکردی، نیاز به مرور و بررسی دقیق این روش‌ها را افزایش داده است (Yue et al., 2023). یک مرور سیستماتیک[۵] به روش علم‌سنجی[۶] می‌تواند با تحلیل روندهای موجود در مطالعات علمی و شناسایی روش‌های مؤثرتر، به محققان و متخصصان این حوزه در انتخاب راهبردهای بهینه‌سازی مناسب و کارآمد کمک کند. در شرایط کنونی که بحران‌های زیست‌محیطی و انرژی به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده است، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها مهم است (Hong & Le, 2023). ساختمان‌ها به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی در سطح جهان، سهمی چشمگیر در تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی دارند (Sharma & Kumar, 2022). با توسعهٔ روش‌های نوین بهینه‌سازی، فرصت‌های جدیدی برای بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها فراهم شده است (Shivaprasad More et al., 2023). بااین‌حال، تنوع این روش‌ها و پیچیدگی‌های مربوط به هرکدام در شرایط و موقعیت‌های مختلف، نیازمند مروری سیستماتیک و جامع بر کارایی و کاربرد آن‌ها در حوزهٔ ساختمان است. اهمیت این مطالعه از آن‌جا ناشی می‌شود که می‌تواند با ارزیابی علمی و تحلیل روندهای تحقیقاتی، بینشی جامع به محققان و متخصصان این حوزه ارائه دهد. مرور سیستماتیک علم‌سنجی روش‌های بهینه‌سازی در ساختمان‌ها، امکان شناسایی کارآمدترین روش‌ها، تحلیل نقاط قوت و ضعف آن‌ها و انتخاب رویکردهای مناسب‌تر برای شرایط خاص اقلیمی و کاربری را فراهم می‌کند. از این منظر، نتایج این پژوهش می‌تواند به سیاست‌گذاران، طراحان و پژوهشگران در تدوین استراتژی‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها کمک کند و نقشی کلیدی در حرکت به‌سوی توسعهٔ پایدار و کاهش بحران انرژی ایفا کند. در رابطه با موضوع این پژوهش، تاکنون مطالعهٔ جامعی که به‌طور سیستماتیک و تلفیقی به بررسی علم‌سنجی روش‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها پرداخته باشد، انجام نشده است. در غیاب چهارچوب تحلیلی منسجم و مشخص برای ارزیابی راهکارهای بهینه‌سازی و تأثیرات آن‌ها بر کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد کلی ساختمان‌ها، این پژوهش می‌کوشد تا با تحلیل جامع متون علمی موجود، به تبیین و شناسایی روندها و گرایش‌های رایج در استفاده از این روش‌ها بپردازد و با هدف برجسته‌سازی مؤثرترین روش‌های بهینه‌سازی انرژی، میزان مشارکت علمی پژوهشگران و مراکز علمی مختلف و همچنین تبیین الگوهای نوظهور و خلأهای تحقیقاتی در این حوزه انجام می‌شود. این مطالعه، ازطریق مرور سیستماتیک مقالات، به‌دنبال شناسایی و طبقه‌بندی روش‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان است تا ضمن تعیین سهم هر روش در کاهش مصرف انرژی، پتانسیل و کارایی آن‌ها در بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها را به تصویر کشد. با توجه به اهمیت بهینه‌سازی انرژی در کاهش هزینه‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی، این مطالعه تلاش می‌کند مدل مفهومی جامع و ساختاری معتبر برای ارزیابی، پایش و مقایسهٔ روش‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها ارائه دهد به‌گونه‌ای که بتوان در چهارچوب این مدل، به‌طور دقیق معیارهایی برای سنجش و ارزیابی میزان موفقیت و اثربخشی مداخلات مختلف درراستای دستیابی به اهداف بهینه‌سازی پایدار تعریف کرد.

این مطالعات نشان‌دهندهٔ روند رشد و توسعهٔ ابزارهای مختلف برای حل مشکلات پیچیده در طراحی و عملکرد ساختمان‌ها هستند. به‌ویژه در چند دههٔ اخیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود راحتی ساکنین به یکی از اولویت‌های مهم در طراحی و مهندسی ساختمان‌ها تبدیل شده است. در جدول ۱ پیشینهٔ پژوهشی مرتبط با بهینه‌سازی در حوزهٔ انرژی مشخص شده است و هدف بهینه‌سازی، مسئلهٔ بهینه‌سازی، حوزهٔ انرژی و الگوریتم مرتبط جهت حل مسئله را نشان داده است.

مبانی نظری

اصطلاح «بهینه‌سازی» در حوزهٔ انرژی ساختمان‌ها لزوماً به معنای دستیابی به بهترین راه‌حل مطلق برای یک مسئله نیست زیرا ماهیت پیچیدهٔ مسئله یا محدودیت‌های موجود در ابزارهای شبیه‌سازی[۷] ممکن است مانع از دستیابی به این هدف شود (Mathebula et al., 2024). بسیاری از پژوهشگران از بهینه‌سازی به‌عنوان فرایندی تکراری برای بهبود عملکرد (Mohanetal.,2023)، بدون الزام به دستیابی به بهترین حالت ممکن، استفاده می‌کنند (Rachmawati et al., 2024). این فرایند غالباً به کمک شبیه‌سازی‌های کامپیوتری انجام می‌شود و نتیجهٔ آن دست‌یابی به راه‌حل‌هایی بهینه یا زیربهینه است (Yang et al., 2024). برخی دیگر از محققان به‌جای تکیه‌بر بهینه‌سازی‌های ریاضی پیچیده، از روش‌هایی مانند تحلیل حساسیت یا طراحی آزمایش به‌عنوان راهکارهایی مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان استفاده کرده‌اند. همچنین، روش‌هایی مانند «جست‌وجوی جبرانی[۸]» (Zhang et al., 2024c) و «بهینه‌سازی مبتنی بر کارشناسان[۹]» (Wen et al., 2024) ازجمله روش‌های بهینه‌سازی در علمکرد انرژی ساختمان است. در بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی[۱۰] (Rahnamayiezekavat et al., 2024)، این اصطلاح به فرایندی کاملاً خودکار اشاره دارد که ترکیبی از شبیه‌سازی عددی و

جدول ۱. پیشینهٔ پژوهشی بهینه‌سازی در حوزهٔ انرژی. مأخذ: نگارندگان.

فهرست	منبع	عنوان	هدف بهینه‌سازی	مسئله	حوزهٔ انرژی	الگوریتم
۱	(Al-Saadi & Al-Jabri, 2020)	بهینه‌سازی طراحی نمای مسکن در اقلیم‌های گرم با استفاده از رویکرد محاسباتی الگوریتم ژنتیک GA	چندهدفه	نما	کاهش مصرف انرژی	ژنتیک
۲	(Bui et al., 2020)	افزایش کارایی انرژی ساختمان‌ها با استفاده از نمای تطبیقی: رویکرد بهینه‌سازی محاسباتی	چندهدفه	نما	افزایش کارایی انرژی	ژنتیک
۳	(Li et al., 2020)	مروری بر روش محاسبهٔ مصرف انرژی عملیاتی برای ساختمان‌های شهری	چندهدفه	فرم	مصرف انرژی	تحلیل خوشه‌ای
۴	(Feng et al., 2021)	الگوریتم ازدحام ذرات برای تراکنش انرژی دو سطحی ساختمان	دوهدفه	انرژی	مصرف انرژی	ازدحام ذرات
۵	(Ikeda & Nagai, 2021)	روش بهینه‌سازی نوین متاهیوریستیک‌ها برای عملیات بهینهٔ روزانه در سیستم‌های انرژی و ذخیره‌سازی ساختمان	چندهدفه	سیستم‌های انرژی	کاهش نیازهای انرژی	فراابتکاری
۶	(Rabani et al., 2021)	عملکرد ساختمان صفر انرژی با بهبود راحتی حرارتی و بصری ازطریق بهینه‌سازی روزنه‌ها، پوشش، دستگاه‌های سایه‌بان و انرژی	چندهدفه	آسایش بصری	ساختمان صفر انرژی	ژنتیک
۷	(She et al., 2021)	هزینهٔ چرخهٔ عمر و انرژی چرخهٔ عمر در ساختمان صفر انرژی ازطریق بهینه‌سازی چندهدفه	چندهدفه	چرخهٔ عمر	صفر انرژی	داده‌های واقعی
۸	(Omrany et al., 2022)	بازنگری در مفهوم سیستم رتبه‌بندی انرژی ساختمان در استرالیا: مسیری به‌سوی طراحی ساختمان صفر انرژی در چرخهٔ عمر	تک‌هدفه	سیستم‌های حرارتی	مصرف انرژی	-
۹	(Mousavi et al., 2023)	بهینه‌سازی ساختمان مسکونی کم‌انرژی برای بهبود انرژی و آسایش حرارتی در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک	چندهدفه	فرم	آسایش حرارتی	الگوریتم‌های یادگیری ماشین
۱۰	(Noorollahi et al., 2024)	بهینه‌سازی چندهدفهٔ تقاضای انرژی و طراحی ساختمان انرژی صفر خالص براساس شرایط اقلیمی (مطالعهٔ موردی: ایران)	چندهدفه	آسایش حرارتی	مصرف انرژی	ژنتیک
۱۱	(Wang et al., 2024a)	بهینه‌سازی چندهدفهٔ مصرف انرژی ساختمان و آسایش حرارتی براساس NSGA-II	چندهدفه	جداره	مصرف انرژی	ژنتیک
۱۲	(Wang et al., 2024b)	ارزیابی الگوریتم‌های تکاملی ترکیب‌شده با شبکهٔ عصبی معمولی برای تعیین مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی	چندهدفه	فرم	مصرف انرژی	تکاملی
۱۳	(Zhang et al., 2024a)	بهینه‌سازی و پیش‌بینی دستگاه‌های سایه‌بان ساختمان‌های اداری برای انرژی، نور روز و منظر با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی	چندهدفه	سایبان	نور روز	ژنتیک
۱۴	(Zhan et al., 2025)	روش بهینه‌سازی چندهدفه برای نوسازی ساختمان‌ها با هزینه‌های اقتصادی و نیمه‌چرخهٔ عمر	چندهدفه	ساخت	هزینهٔ چرخهٔ عمر	ژنتیک
۱۵	(Zhu et al., 2025)	کاربرد الگوریتم ترکیبی یادگیری ماشین در بهینه‌سازی چندهدفهٔ کارایی انرژی ساختمان‌های سبز	چندهدفه	-	مصرف انرژی	ژنتیک
۱۶	(Wang et al., 2025)	مدیریت انرژی مقاوم در یک ساختمان چندانرژی تحت گرمایش منطقه‌ای رویکرد یادگیری تقویتی عمیق	چندهدفه	-	مصرف انرژی	یادگیری ماشین

بهینه‌سازی ریاضی است (Quang & Phuong, 2024). این فرایند معمولاً با اتصال برنامهٔ شبیه‌سازی انرژی ساختمان به یک «موتور بهینه‌سازی[11]» متشکل از یک یا چند الگوریتم[12] به‌صورت خودکار انجام می‌شود. همچنین بهینه‌سازی مبتنی‌بر شبیه‌سازی، امروزه به ابزاری قدرتمند برای طراحی ساختمان‌هایی با عملکرد بالا و پاسخگویی به نیازهای روزافزون در زمینهٔ ساختمان‌های کم‌انرژی (Saffari et al., 2023)، ساختمان‌های سبز و ساختمان‌های بدون کربن تبدیل شده است. مطالعات انجام‌شده توسط پژوهشگرانی نظیر وانگ[13]، فسانگاری (Ogar et al., 2023)، بمبروک[14] (Shivaprasad More et al., 2023) و کسترو-لاکوتور[15] (Khodadadi, 2023) نشان داده است که استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی در طراحی ساختمان‌های با کارایی انرژی بالا، به‌دلیل امتیازات اضافی این ویژگی‌ها در سیستم‌های رتبه‌بندی ساختمان‌های سبز (مانند امتیازات LEED)، می‌تواند تأثیرات مثبتی در کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد پایدار ساختمان‌ها داشته باشد (Hong & Nguyen, 2023).

- **بهینه‌سازی در علوم مختلف**

بهینه‌سازی از دیدگاه‌های مختلف تعاریف گوناگونی دارد و با توجه به حوزه‌های علمی، رویکردهای مختلفی برای تعریف آن به‌کار می‌رود. در تصویر ۱، چند تعریف بهینه‌سازی از دیدگاه‌های مختلف مرور شده است. به‌طور کلی، بهینه‌سازی شامل مجموعه‌ای گسترده از روش‌ها، از رشته‌های مختلفی مانند مطالعه در عملیات، هوش مصنوعی (Bragadin et al., 2022)، علوم کامپیوتر و یادگیری ماشین[16] است که برای بهبود فرایندهای معماری و بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها استفاده می‌شود.

- **شبیه‌سازی انرژی با بهینه‌سازی**

علاوه‌بر این، مسائل بهینه‌سازی (Duhirwe et al., 2023) در بسیاری از جنبه‌های معماری و طراحی پایدار مطرح می‌شوند. به عنوان مثال، در طراحی انرژی معماری (Güney, 2023)، یک معمار که درحال طراحی یک ساختمان مسکونی یا اداری است، باید موادی را انتخاب کند که نه‌تنها از نظر اقتصادی به‌صرفه باشند (Olave, 2022)، بلکه ویژگی‌های حرارتی مناسب برای کاهش مصرف انرژی و افزایش بازدهی حرارتی را نیز داشته باشند. به‌طور مشابه، در شبیه‌سازی انرژی (Ghasemi Nasab et al., 2021)، مهندسان باید جایگاه و اندازهٔ پنجره‌ها، نوع شیشه، میزان عایق‌بندی و جهت‌گیری ساختمان را طوری تعیین کنند که میزان نور طبیعی و گرمای خورشید به‌صورت بهینه وارد ساختمان شود. در این فرایند، الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توانند به معماران کمک کنند تا با شبیه‌سازی چندین سناریوی مختلف، ترکیبی بهینه از مصالح، سیستم‌های انرژی و طراحی محیطی پیدا کنند. به عنوان نمونه، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی[17] مانند بهینه‌سازی شبیه‌سازی حرارتی[18] که برپایهٔ شبیه‌سازی دمایی (Xu et al., 2024) و رفتار حرارتی (Yu et al., 2024)، در ساختمان طراحی شده‌اند، می‌تواند به معماران کمک کند تا یک طراحی کارآمد و کم‌مصرف داشته باشند. این روش‌ها می‌توانند تعادل بین طراحی زیباشناختی، بهره‌وری انرژی و هزینه‌های ساخت (Zhang et al., 2024b) را بهبود بخشند و در نتیجه منجربه ساخت سازه‌هایی شوند که علاوه‌بر زیبایی، بازدهی انرژی بالاتری دارند و از منابع انرژی کمتری استفاده می‌کنند.

امروزه، ابزارهای شبیه‌سازی زیادی با رابط‌های کاربری دوستانه و منابع آموزشی فراوان موجود است. با استفاده از آن‌ها، تیم‌های طراحی پس‌از تعریف تعدادی از پارامترهای تصمیم‌گیری، می‌توانند طراحی‌های جدیدی را که ازطریق رویکرد سنتی دسترسی به آن‌ها امکان‌پذیر نبود، کاوش کنند (Yang et al., 2024). به‌عنوان مثال، تغییرات قانونی اخیر در اروپا منجربه بازبینی کدهای ملی انرژی ساختمان شده است تا شامل رویکردهای محاسباتی پیشرفته‌تر شوند (Wang et al., 2024c). بنابراین، در بیشتر موارد، رعایت کدها عامل محرک استفاده از این ابزارها است (Tajik et al., 2024) اما این موضوع تضمینی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان ندارد (Su & Zhao, 2024). تاکنون، مطالعاتی که بر تأثیر پارامترهای مختلف بر طراحی ساختمان تمرکز کرده‌اند، به تحلیل‌های پارامتریک تکیه داشته‌اند که خود به شبیه‌سازی‌های دقیق ساختمان مبتنی بوده‌اند. این شبیه‌سازی‌ها از نظر محاسباتی پرهزینه هستند و استفاده از تکنیک‌های مبتنی‌بر نیرو برای ارزیابی تمام راه‌حل‌های ممکن فرایندی غیرقابل انجام است. بنابراین، نیاز به کاوش بهینه‌تر و سریع‌تر فضای راه‌حل منجربه پذیرش تکنیک‌های بهینه‌سازی شد. لازم به ذکر است که انتقال یک مشکل طراحی واقعی به دامنهٔ ریاضی، محدودیت‌هایی دارد و الگوریتم‌های بهینه‌سازی متداول که در مسائل طراحی ساختمان به‌کار می‌روند تضمین نمی‌کند که راه‌حل بهینه پیدا

تصویر ۱. تعریف بهینه‌سازی در علوم مختلف. مأخذ: Bragadin et al., 2022

خواهد شد (Quang & Phuong, 2024). بااین‌حال، ممکن است عملکرد بهتر ساختمان در مقایسه با روش‌های معمول که در آن‌ها بهینه‌سازی استفاده نمی‌شود، به‌دست (Nouri et al., 2023). بنابراین، درک نقاط قوت و ضعف روش‌های بهینه‌سازی برای استفادهٔ مؤثر از آن‌ها در مسائل طراحی مربوطه ضروری است. ابزارهای شبیه‌سازی عملکرد ساختمان به‌طور گسترده‌ای توسط جامعهٔ مطالعاتی استفاده شده‌اند اما تنها در دههٔ اخیر بود که این ابزارها در فرایند طراحی معماری[۱۹] به‌کار گرفته شدند. دلایل زیادی برای این تأخیر وجود دارد، ازجمله دشواری استفاده از این ابزارها، کسب مهارت‌های لازم، هزینه‌های مرتبط با آن‌ها، عدم قطعیت در نتایج و تصور عمومی که طراحی‌کننده توسط محدودیت‌های ابزارها محدود است.

- **عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی و انتخاب آن‌ها**

تقاضا برای یک روش جست‌وجو که به‌طور کارآمد روی یک مشکل بهینه‌سازی خاص عمل کند، منجربه توسعهٔ الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی شده است. بنابراین، انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی مناسب برای یک مشکل خاص برای دستیابی به بیشترین کاهش در هدف مسئله، بسیار مهم است (Ismail, 2024). مشکل انتخاب یک روش بهینه‌سازی برای یک مسئلهٔ بهینه‌سازی ساختمان به‌سادگی قابل حل نیست و معمولاً براساس تعدادی از ملاحظات صورت می‌گیرد؛ مانند، ماهیت متغیرهای طراحی (متغیرهای پیوسته، متغیرهای گسسته یا هر دو)، وجود محدودیت‌ها روی تابع هدف و ماهیت توابع هدف (خطی یا غیرخطی، محدب یا غیرمحدب، پیوسته یا گسسته، تعداد مینیمم‌های محلی و غیره) (Hong & Pham, 2024). در تصویر ۲ طبقه‌بندی مسائل بهینه‌سازی مشخص شده است.

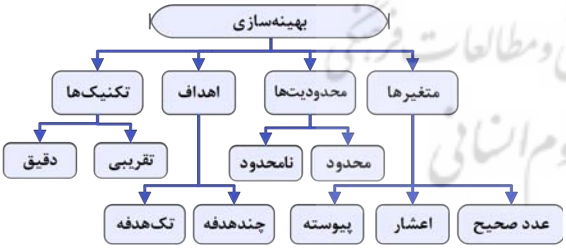
- **طبقه‌بندی روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ساختمان**

طبقه‌بندی مسائل بهینه‌سازی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی هر دو مبنای مهمی برای توسعهٔ استراتژی‌های جدید بهینه‌سازی و انتخاب الگوریتم مناسب برای یک مسئلهٔ خاص محسوب می‌شوند (Deng et al., 2024). تصویر ۲ یک طبقه‌بندی کلی از مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. برخی دیگر از دسته‌بندی‌ها که در زمینه‌های دیگر مطرح شده‌اند (مانند بهینه‌سازی فازی) در بهینه‌سازی عملکرد ساختمان کاربرد ندارند، بنابراین در این مطالعه ذکر نشده‌اند. در تصویر ۳ روند پژوهش مشخص شده است.

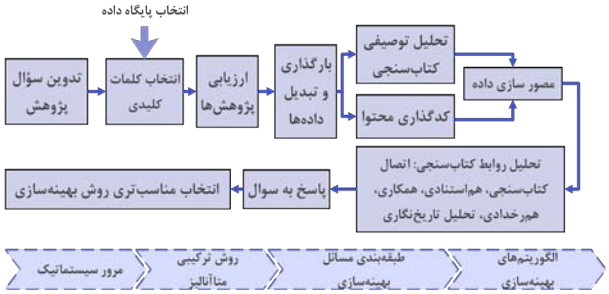
روش پژوهش

این پژوهش با استفاده از یک روش مرور سیستماتیک و با تمرکز بر روش‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها انجام شده است. این روش به‌دنبال شناسایی، ارزیابی، انتخاب و تلفیق شواهد علمی مرتبط با موضوع بهینه‌سازی انرژی در حوزهٔ ساختمان است. شکل هرم پژوهشی نیز قدرت انواع طرح‌های پژوهش را به تصویر می‌کشد، به‌طوریکه مطالعات با تجزیه و تحلیل کمی و روش‌های علمی دقیق در رأس هرم قرار دارند و اعتبار داخلی بالاتری دارند. این مطالعه از روش ارزیابی سیستماتیک و مراحل چهارگانهٔ ولفسوینکل و همکاران بهره می‌گیرد (Ghaderi Dehkordi & Nedaei Toosi, 2024). این مراحل عبارتند از: تعریف، جست‌وجو، انتخاب، تحلیل و سنتز. در ادامه به تشریح هر یک از این مراحل می‌پردازیم: در اولین مرحله، دامنه و محدودهٔ پژوهش مشخص می‌شود. این مرحله پیش از آغاز جست‌وجو و با بحث‌های تکراری میان مؤلفان شکل می‌گیرد. این فرایند شامل شناسایی پایگاه‌های دادهٔ مناسب، تعیین کلیات جست‌وجو و انتخاب اصطلاحات کلیدی است. برای شناسایی منابع مرتبط، جست‌وجو در پایگاه‌های دادهٔ علمی مانند Web of Science، Scopus، ProQuest و Google Scholar انجام شد. همچنین از پایگاه‌های داخلی مانند ایرانداک، SID و مگیران نیز استفاده گردید. برای این جست‌وجو، کلیدواژه‌های «بهینه‌سازی انرژی در ساختمان»، «روش‌های بهینه‌سازی ساختمان» و «بهینه‌سازی پایدار انرژی» در بازهٔ زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ استفده شد. منابع معتبر شناسایی‌شده، شامل مقالات، پایان‌نامه‌ها و کتاب‌های مرتبط، برای تحلیل‌های بعدی در نرم‌افزار EndNote ثبت و ذخیره شدند و منابع تکراری حذف گردید. در مرحلهٔ انتخاب، عنوان‌ها، چکیده‌ها و کلمات کلیدی تمامی منابع بررسی شد تا موارد واجد شرایط انتخاب شوند. مطالعاتی که به موضوع بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها مرتبط بودند و اصول مرتبط با این حوزه را بررسی کرده بودند، انتخاب شدند. متن کامل این مقالات جهت بررسی دقیق‌تر دوباره مطالعه شد.

تحلیل: در این مرحله، به تحلیل محتوای مقالات و منابع واجد



تصویر ۲. طبقه‌بندی مسائل بهینه‌سازی. مأخذ: Hong & Pham, 2024



تصویر ۳. روند پژوهشی. مأخذ: نگارندگان.

شرایط پرداخته شد. این تحلیل با تمرکز بر روش‌های بهینه‌سازی رایج و پیشرفته در بهینه‌سازی انرژی در ساختمان، همچنین تکنیک‌های استفاده‌شده در هر مطالعه انجام شد.

سنتز: در مرحله سنتز، نتایج مطالعات مختلف با یکدیگر ترکیب و تلفیق شدند تا تصویری جامع از وضعیت فعلی روش‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان و نتایج آن‌ها ارائه شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهندهٔ کاربرد وسیع روش‌های بهینه‌سازی مختلف، ازجمله الگوریتم‌های ژنتیک، طراحی پارامتریک، یادگیری ماشین و بهینه‌سازی چندهدفه[۲۰] در این حوزه است. این مرور سیستماتیک، دید جامعی از تکنیک‌ها و گرایش‌های جدید در زمینهٔ بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها ارائه می‌دهد و می‌تواند راهنمای مفیدی برای پژوهشگران و مهندسان فعال در این حوزه باشد. تحلیل شبکهٔ موضوعی: تحلیل شبکهٔ کلمات کلیدی از خروجی نرم‌افزار VOSviewer انجام شد. این تحلیل به‌منظور شناسایی مفاهیم و موضوعات مرتبط با بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها صورت گرفت. در این مرحله، کلمات کلیدی و ارتباطات آن‌ها با استفاده از کدگذاری بازبررسی شدند و کلمات کلیدی با فراوانی و قدرت ارتباط بالا استخراج شدند. نتایج نشان می‌دهد موضوعات بهینه‌سازی، طراحی مولد، الگوریتم‌های ژنتیک، یادگیری ماشین و بهینه‌سازی پارامتریک از مفاهیم کلیدی در این حوزه هستند. این موضوعات نشان‌دهندهٔ اهمیت و کاربرد گستردهٔ این روش‌ها در بهینه‌سازی انرژی و عملکرد ساختمان‌ها است. به‌منظور ترکیب و یکپارچه‌سازی نتایج، از روش تحلیل مضمون استفاده شد. این روش امکان شناخت و تحلیل الگوهای موجود در داده‌های کیفی را فراهم می‌کند. با استفاده از این تکنیک، مفاهیم شناسایی‌شده به دسته‌های کلان‌تر و ساختارمندتری تقسیم‌بندی شدند. نتیجه نشان می‌دهد موضوعات اصلی به دو دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند: روش‌های بهینه‌سازی متداول مانند الگوریتم ژنتیک و طراحی پارامتریک و روش‌های نوین مانند یادگیری ماشین و طراحی مولد که به‌دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی بهینه‌سازی هم‌زمان چندین معیار، بیشتر پژوهشگران به آن‌ها توجه کرده‌اند.

یافته‌ها

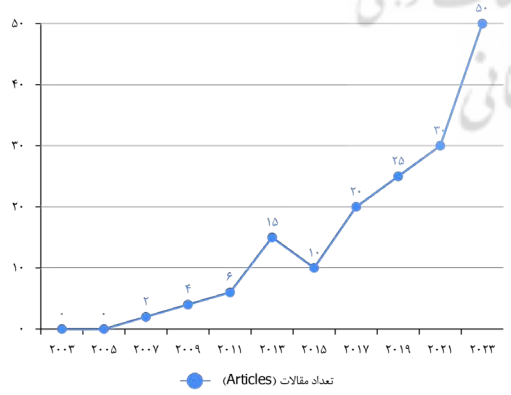
جست‌وجوی اولیه در حوزه‌های مختلف منجربه شناسایی ۱۹۴۰ مقالهٔ مرتبط با موضوع بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها شد. پس از پالایش و بررسی‌های دقیق‌تر، تعداد این مقالات به ۲۹۰ مقاله کاهش یافت که برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. این مقالات به دسته‌های مختلف تقسیم و تجزیه و تحلیل شدند تا اهداف، روندها و تکنیک‌های بهینه‌سازی رایج در آن‌ها مشخص شود. روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه و استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و یادگیری ماشین ازجمله رویکردهای پرکاربرد در این مقالات بودند.

تحلیل زمانی: براساس سال انتشار مقالات و روند رشد این حوزه انجام شد. نتایج نشان می‌دهد از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ تاکنون رشد قابل توجهی در استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در حوزهٔ انرژی ساختمان به‌ویژه در زمینهٔ الگوریتم‌های تکاملی و یادگیری ماشین وجود داشته است (تصویر ۴). در تصویر ۵ این رشد نشان‌دهندهٔ اهمیت روزافزون این روش‌ها در افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌هاست.

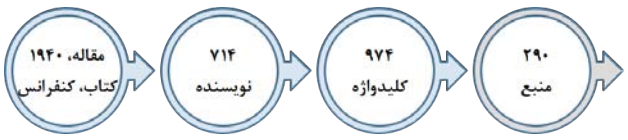
تحلیل مکانی: مطالعات علمی در حوزهٔ بهینه‌سازی انرژی ساختمان‌ها به‌طور عمده در کشورهای توسعه‌یافته مانند ایالات متحده، چین، آلمان و سنگاپور انجام شده است. این کشورها با بهره‌مندی از زیرساخت‌های پیشرفتهٔ تحقیقاتی، دسترسی به منابع علمی برجسته و مشارکت در همکاری‌های بین‌المللی، نقش کلیدی در پیشبرد پژوهش‌های مرتبط با بهینه‌سازی انرژی ایفا می‌کنند. داده‌های تحلیل شبکه نشان می‌دهد مقالات منتشرشده در این کشورها استنادهای مکرر دارند و شبکه‌ای منسجم از منابع علمی معتبر ایجاد کرده‌اند. تصویر ۶، شبکهٔ علمی نشان‌دهندهٔ تأثیرگذاری پژوهشگران این کشورها در هدایت جریان علمی جهانی در حوزهٔ بهینه‌سازی انرژی را نشان می‌دهد.

تحلیل شبکهٔ استنادی: پس از گردآوری اطلاعات در بخش تحلیل محتوا و پالایش یافته‌ها در اکسل با استفاده از کدگذاری، طی سه مرحله، کلیدواژه‌های مرتبط با روش‌های بهینه‌سازی مستخرج‌شده در جدول ۲ و در مضمون شاخص سازمان‌دهنده تفکیک شده است.

برای ترکیب نتایج، از روش تلفیق کیفی و تحلیل مضمون استفاده شد. این روش، به‌طور ویژه در تحلیل داده‌های کیفی مؤثر است و داده‌های پراکنده را به‌صورت یکپارچه و مفهومی تبدیل می‌کند. تحلیل مضمون کمک می‌کند الگوهای اصلی و رایج در داده‌ها شناسایی و گزارش شوند. بر این اساس، مجموعه‌ای از مضامین اصلی،



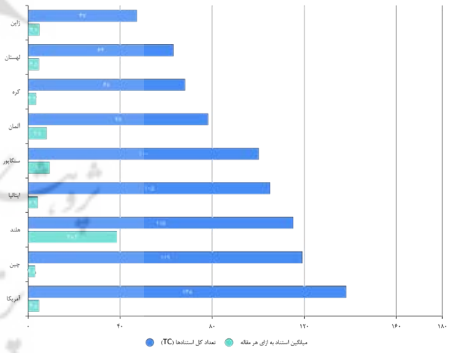
تصویر ۴. روش انتخاب منابع. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۵. توزیع فراوانی مطالعات انجام‌شده براساس تحلیل زمانی داده‌ها. مأخذ: نگارندگان.

جدول ۲. تبدیل مضامین پایهٔ اصلی و فرعی به مضامین سازمان‌دهنده. مأخذ: نگارندگان.

لینک	مضامین سازمان‌دهنده	فراوانی	روش/الگوریتم
۸	روش‌های مبتنی‌بر الگوریتم‌ها	۱	بهینه‌سازی ترکیبی
۱۲	روش‌های بهینه‌سازی	۲	بهینه‌سازی عددی
۱	روش‌های بهینه‌سازی	۱	بهینه‌سازی هندسی
۱	روش‌های بهینه‌سازی	۱	جست‌وجوی متنوع
۱۰	جست‌وجوی محلی	۴	جست‌وجوی محلی هدایت‌شده
۶	جست‌وجوی محلی	۱	جست‌وجوی محلی
۳۵	روش‌های شبیه‌سازی	۱۳	شبیه‌سازی به کمک داده‌های واقعی
۵	روش‌های شبیه‌سازی	۱	شبیه‌سازی به کمک داده‌های تجربی
۸	تحلیل رفتار	۲	شبیه‌سازی رفتار کاربران
۹	روش‌های شبیه‌سازی	۳	شبیه‌سازی محلی
۲۷	الگوریتم‌های هوشمند	۹	هوش ازدحامی
۴۰	الگوریتم‌های تکاملی	۱۵	الگوریتم‌های تکاملی
۶۶	الگوریتم‌های ژنتیک	۳۵	الگوریتم ژنتیک
۱۱	هوش ازدحامی	۲	بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها
۳۴	هوش ازدحامی	۱۳	بهینه‌سازی ازدحام ذرات
۷	روش‌های شبیه‌سازی	۱	شبیه‌سازی شده

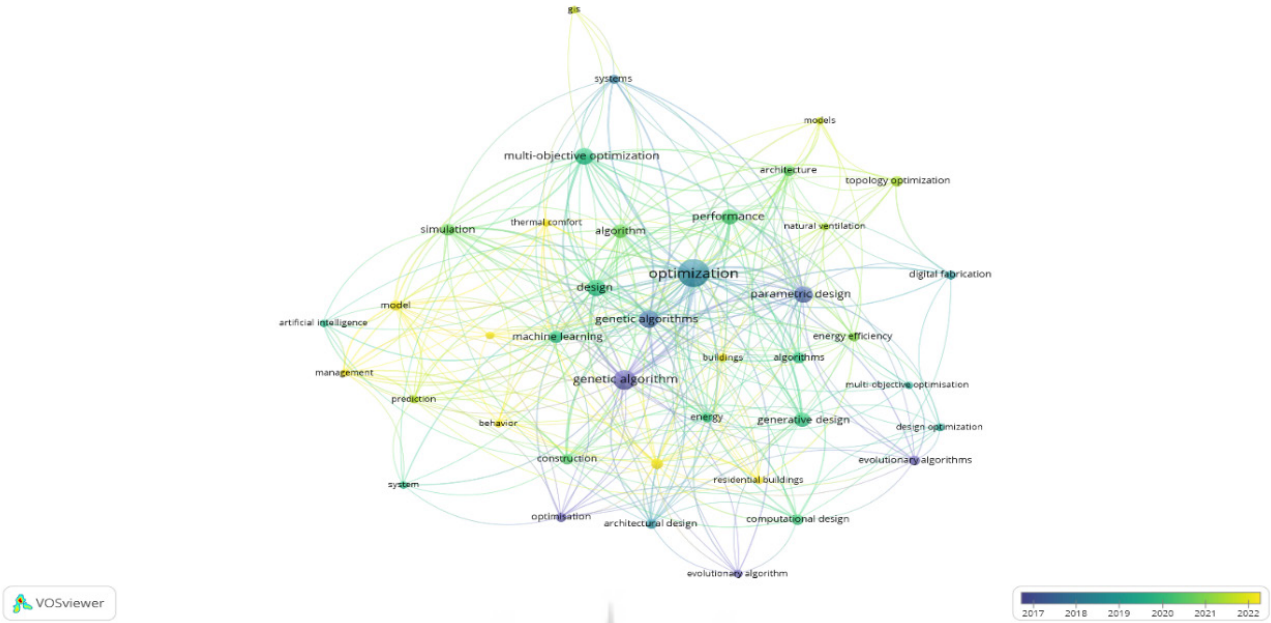


تصویر ۶. میانگین استناد در هر کشور. مأخذ: نگارندگان.

مانند «بهینه‌سازی»، «طراحی پارامتریک»، «الگوریتم‌های ژنتیک» و «الگوریتم تکاملی» شناسایی شدند که به‌عنوان مفاهیم اصلی در بهینه‌سازی انرژی ساختمان‌ها تکرار شده‌اند این مضامین نه‌تنها مفاهیم کلیدی را نمایان می‌سازند، بلکه به محققان در درک بهتر پژوهش‌های موجود و هدایت مطالعات آینده کمک می‌کنند. برای تحلیل شبکهٔ علمی و شناسایی کلیدواژه‌های کلیدی در پژوهش‌های مختلف، از نرم‌افزارهای علم‌سنجی مانند VOSviewer استفاده می‌شود. این نرم‌افزارها کلیدواژه‌هایی را شناسایی می‌کنند که از نظر تعداد تکرار و قدرت لینک کلی بیشترین اهمیت را در شبکهٔ علمی دارند. براساس داده‌ها و نمودار ارائه‌شده، می‌توان کلیدواژه‌های پرکاربرد و با ارتباط قوی را استخراج کرد که بیانگر موضوعات اصلی در این حوزهٔ پژوهشی هستند. در تصویر ۷ شبکهٔ علمی منابع در حوزهٔ روش‌های پژوهش مشخص شده است.

بحث

تحلیل شبکهٔ موضوعی و استنادی در این پژوهش نشان می‌دهد روش‌های بهینه‌سازی مبتنی‌بر الگوریتم‌های تکاملی و یادگیری ماشین، در بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. علاوه‌بر این، استفاده از طراحی مولد و پارامتریک نیز به‌دلیل انعطاف‌پذیری و دقت بالا، نشان می‌دهد در سال‌های اخیر به یکی از حوزه‌های داغ پژوهشی تبدیل شده است (جدول ۱). در تحلیل روش‌ها و الگوریتم‌های استفاده‌شده در مطالعه‌ها، نتایج نشان می‌دهد برخی از این روش‌ها نقش کلیدی‌تری در حل مسائل پیچیده و دستیابی به اهداف پژوهشی ایفا کرده‌اند. الگوریتم ژنتیک با ۳۵ بار استفاده، پرکاربردترین روش شناخته می‌شود که به‌دلیل قدرت بالای آن در حل مسائل بهینه‌سازی و طراحی پیچیده، در بسیاری از پروژه‌های مطالعاتی به‌کار رفته است. در رتبهٔ دوم، الگوریتم‌های تکاملی با ۱۵ بار استفاده قرار دارند که به‌طور گسترده در بهینه‌سازی‌های چندهدفه و حل مسائل پیچیده استفاده شده‌اند. از دیگر روش‌های محبوب



تصویر ۷. شبکهٔ علمی منابع در حوزهٔ روش‌های بهینه‌سازی. مأخذ: نگارندگان.

می‌توان به شبیه‌سازی به کمک داده‌های واقعی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات اشاره کرد که هر کدام با ۱۳ بار استفاده، ابزارهای مؤثری برای تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی فرایندهای پویا به‌شمار می‌روند. همچنین، هوش ازدحامی با ۹ بار استفاده جایگاه ویژه‌ای در مطالعات مرتبط با مسائل غیرقطعی و پیچیده پیدا کرده است. در مقابل، روش‌هایی مانند بهینه‌سازی عددی، شبیه‌سازی به کمک داده‌های تجربی و شبیه‌سازی رفتار کاربران کاربرد محدودی داشته‌اند و تنها در موارد خاص استفاده شده‌اند. جالب توجه است که برخی از روش‌ها مانند بهینه‌سازی ترکیبی، بهینه‌سازی هندسی و تکامل تفاضلی در داده‌های تحلیل‌شده هیچ کاربردی نداشته‌اند، که این موضوع ممکن است ناشی از محدودیت‌های این روش‌ها در حوزه‌های مطالعاتی خاص باشد. در مجموع، داده‌های به‌دست‌آمده نشان می‌دهند روش‌های مبتنی‌بر الگوریتم‌های تکاملی و شبیه‌سازی داده‌های واقعی، بیشترین کارایی و محبوبیت را در مطالعات داشته‌اند. این نتایج می‌تواند مبنای مفیدی برای طراحی پژوهش‌های آینده و انتخاب روش‌های مؤثرتر باشد. در تصویر ۸ مضامین سازمان‌دهنده در روش‌های بهینه‌سازی مشخص شده است.

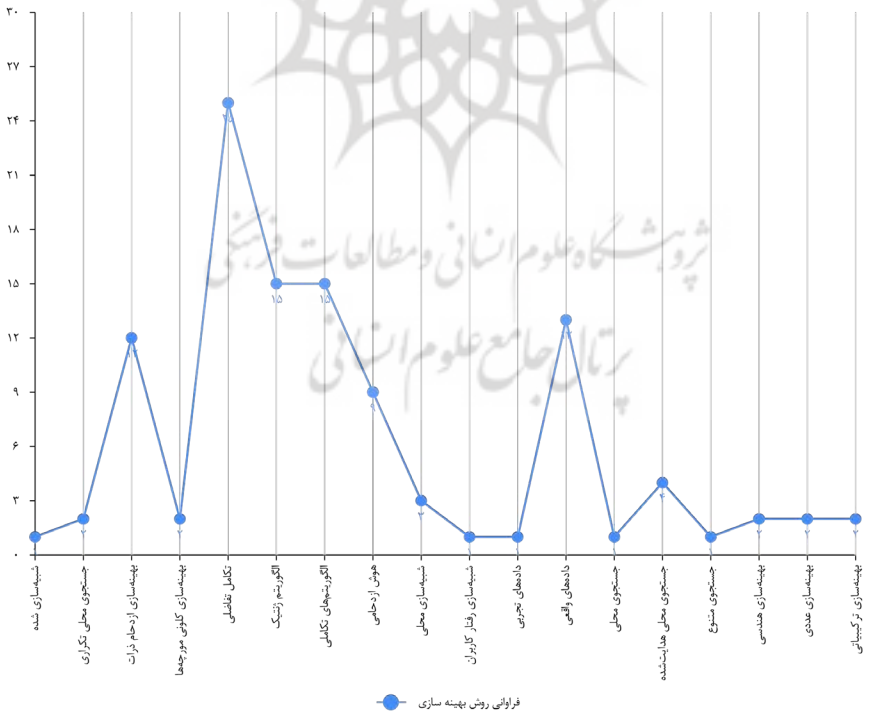
کلیدواژه‌های مهم به ترتیب عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک با ۳۵ بار استفاده و قدرت لینک کلی ۶۲، نشان‌دهندهٔ یکی از پرکاربردترین ابزارهای بهینه‌سازی در مسائل پیچیده است. الگوریتم‌های تکاملی با ۱۵ بار استفاده، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه شناخته می‌شود. شبیه‌سازی به کمک داده‌های واقعی با ۱۳ تکرار، به‌دلیل دقت بالا در پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها، یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی عملکرد بوده است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیز با ۱۳ بار استفاده، به‌طور گسترده در حل مسائل مهندسی و بهینه‌سازی به‌کار رفته است. هوش ازدحامی با ۹ تکرار، بر اهمیت استفاده از رویکردهای نوین برای حل مسائل غیرخطی تأکید دارد. جست‌وجوی محلی هدایت‌شده با ۴ بار استفاده، یکی از روش‌های متمرکز برای حل مسائل بهینه‌سازی است. شبیه‌سازی محلی و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها هر کدام با ۲ تکرار، به‌صورت محدود در مسائل خاص بهینه‌سازی کاربرد دارند. روش‌هایی مانند بهینه‌سازی ترکیبی و تکامل تفاضلی که در داده‌های موجود هیچ استفاده‌ای نداشته‌اند، احتمالاً در حوزهٔ موردنظر کارایی کمتری داشته‌اند یا کمتر به آن‌ها توجه شده است. این کلیدواژه‌ها نمایانگر موضوعات اصلی و ابزارهای پرکاربرد در حوزهٔ بهینه‌سازی و شبیه‌سازی هستند و می‌توانند به‌صورت گرافیکی برای نمایش شبکهٔ علمی استفاده شوند. این تحلیل نشان می‌دهد تمرکز اصلی پژوهش‌ها بر الگوریتم‌های تکاملی، شبیه‌سازی‌های دقیق و روش‌های نوین بهینه‌سازی است.

نتایج مقایسه‌ای: گرایش به استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و شبیه‌سازی‌های مبتنی‌بر داده‌های واقعی، به‌ویژه در حوزه‌های پیچیدهٔ بهینه‌سازی و مهندسی، درحال افزایش است. این نشان‌دهندهٔ رشد و توسعهٔ روش‌های نوین در این حوزه است که می‌تواند به بهبود کارایی و دقت در حل مسائل پیچیده کمک کند. در تصویر ۸ تعداد مضامین در روش‌های بهینه‌سازی مشخص شده است. در جدول ۳ نتایج مقایسه‌ای از مزایا و معایب و نحوهٔ پیاده‌سازی به‌صورت مختصر مشخص شده است.

الگوریتم ژنتیک برای مسائل پیچیده و غیرخطی بسیار

جدول ۳. نتایج مقایسه‌ای الگوریتم‌ها. مأخذ: نگارندگان.

الگوریتم	مزایا	معایب	نحوهٔ پیاده‌سازی
الگوریتم ژنتیک	قابلیت جست‌وجو در فضای بزرگ و پیچیده پارامترها. مناسب برای مسائل غیرخطی و چندهدفه.	زمان محاسباتی بالا، به‌ویژه در مسائل پیچیده. نیاز به تنظیمات دقیق پارامترها.	در پروژه‌های پیچیده با تعداد زیاد متغیر، به‌ویژه در مسائل غیرخطی و چندهدفه بسیار مؤثر است.
هوش ازدحامی	قابلیت حل مسائل غیرخطی. جست‌وجوی سریع در فضای بزرگ پارامترها.	ممکن است به نتایج محلی برسد. نیاز به تنظیم دقیق الگوریتم برای عملکرد بهینه.	در مسائل با ابعاد بزرگ و مسائل غیرخطی که نیاز به جست‌وجوی بهینه در فضای جواب دارند، مناسب است.
شبیه‌سازی مبتنی‌بر داده‌های واقعی	دقت بالا در پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها. مناسب برای مدل‌سازی دقیق و ارزیابی عملکرد سیستم‌ها.	نیاز به داده‌های دقیق و به‌روز در پروژه‌های بدون داده‌های معتبر محدود است.	در پروژه‌هایی با داده‌های دقیق و مدل‌سازی دقیق انرژی ساختمان، به‌ویژه برای پیش‌بینی مصرف انرژی، کاربرد دارد.
تکنیک‌های جست‌وجوی محلی	سریع و کارآمد برای مسائل ساده‌تر. قابل پیاده‌سازی در زمان کم.	احتمال حفر بهینهٔ محلی مناسب برای مسائل پیچیده نیست.	برای مسائل کوچک و مسائل با ابعاد کمتر که به جست‌وجوی دقیق نیاز ندارند، کاربرد دارد.
طراحی مولد و پارامتریک	بهینه‌سازی طراحی‌های پیچیده و پارامتریک. انعطاف‌پذیری بالا در طراحی‌های متغیر.	نیاز به مراحل محاسباتی پیچیده. نیاز به زمان محاسباتی زیاد در طراحی‌های پیچیده.	در پروژه‌هایی که نیاز به طراحی انعطاف‌پذیر و شبیه‌سازی‌های پیچیده دارند، بسیار مؤثر است.
بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها	جست‌وجوی گسترده و کارآمد در فضای بزرگ. مناسب برای مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای زیاد.	محدودیت در مسائل با ابعاد بالا و پیچیدگی‌های زیاد. ممکن است به حل‌های محلی محدود شود.	برای مسائل بهینه‌سازی با ابعاد بزرگ و پروژه‌هایی که نیاز به جست‌وجوی گسترده در فضای جواب دارند، مناسب است.
هوش مصنوعی و یادگیری ماشین	توانایی یادگیری از داده‌ها و پیش‌بینی دقیق. قابلیت ارتقاء و بهبود عملکرد در طول زمان.	نیاز به داده‌های آموزشی معتبر. پیچیدگی در پیاده‌سازی و نیاز به تخصص بالا.	برای پروژه‌های دینامیک و داده‌های بزرگ که نیاز به پیش‌بینی دقیق دارند، بسیار مناسب است.
روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی و تکامل تفاضلی	توانایی در حل مسائل پیچیده. قابلیت جست‌وجوی بهینه در فضای بزرگ.	پیچیدگی محاسباتی بالا. در برخی از شرایط ممکن است کارایی کمتری داشته باشد.	در پروژه‌هایی که به حل مسائل پیچیده و جست‌وجوی گسترده نیاز دارند، مؤثر است.



تصویر ۸. مضامین سازمان‌دهنده در روش‌های بهینه‌سازی. مأخذ: نگارندگان.

مؤثر است، اما به‌دلیل زمان محاسباتی بالا ممکن است در پروژه‌های بزرگ با داده‌های زیاد چالش‌هایی ایجاد کند. درحالیکه شبیه‌سازی مبتنی‌بر داده‌های واقعی برای پیش‌بینی دقیق نیاز به داده‌های معتبر و به‌روز دارد، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌توانند در پروژه‌های دینامیک و داده‌های بزرگ عملکرد بهتری داشته باشند.

تحلیل تکنیک‌ها: در زمینهٔ بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها، انتخاب ابزار مناسب برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به‌شدت وابسته به ویژگی‌های خاص پروژه و پیچیدگی‌های آن است. الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی می‌توانند در شرایط متفاوت عملکرد متفاوتی داشته باشند. یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم ژنتیک است که به‌ویژه در پروژه‌هایی که نیاز به جست‌وجوی گسترده در فضای پارامترها دارند، عملکرد بهتری دارد. این الگوریتم به‌دلیل توانایی‌اش در جست‌وجو در فضاهای بزرگ و پیچیده، برای مسائل با تعداد زیاد متغیر و روابط غیرخطی مناسب است. به‌طور خاص، پروژه‌هایی که طراحی ساختمان‌ها نیاز به بهینه‌سازی همزمان پارامترهای مختلف مانند مصرف انرژی، ظرفیت تهویه و ویژگی‌های ساختاری دارند، می‌توانند از الگوریتم‌های ژنتیک بهره‌مند شوند. از سوی دیگر، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) نیز یکی دیگر از ابزارهای مؤثر در بهینه‌سازی انرژی است. این الگوریتم به‌ویژه در پروژه‌هایی که نیاز به تعاملات پیچیده میان عوامل مختلف دارند و سیستم‌هایی که رفتارهای پیچیده‌ای دارند، مناسب است. در مقابل، تکنیک‌های جست‌وجوی محلی هدایت‌شده برای پروژه‌هایی که نیاز به حل مسائل ساده‌تر و محدودتر دارند، مؤثرتراند. این الگوریتم‌ها به‌ویژه در مواردی که طراحی سیستم‌های ساده‌تر مانند سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی و تهویه مطبوع مدنظر است، کاربرد دارند. جست‌وجوی محلی هدایت‌شده عملکرد سریعی در مسائل با ابعاد کوچک و مشکلات خاص دارد و می‌تواند در شرایطی که زمان و منابع محدود است، به نتایج مناسبی دست یابد.

همچنین، شبیه‌سازی مبتنی‌بر داده‌های واقعی یکی از ابزارهای کلیدی در بهینه‌سازی انرژی است که به دقت و انطباق بهتر مدل‌های شبیه‌سازی با شرایط واقعی کمک می‌کند. این روش به‌ویژه در پروژه‌هایی که به دقت بالا و پیش‌بینی دقیق مصرف انرژی نیاز دارند، مؤثر است. در پروژه‌هایی که اطلاعات تاریخی و داده‌های تجربی زیادی در دسترس هستند، این نوع شبیه‌سازی‌ها می‌توانند نتایج دقیق‌تری ارائه دهند و به طراحان کمک کنند تا مدل‌های خود را با شرایط واقعی تطابق دهند. درنهایت، انتخاب ابزار بهینه‌سازی مناسب باید براساس ویژگی‌های خاص هر پروژه صورت گیرد. پروژه‌هایی که ویژگی‌های پیچیده‌تری مانند سیستم‌های غیرخطی، تعداد زیاد متغیرها و تعاملات پیچیده میان عوامل مختلف دارند، از الگوریتم‌های الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهره‌مند خواهند شد. در عین حال، در پروژه‌هایی با پیچیدگی کمتر، استفاده از تکنیک‌های جست‌وجوی محلی هدایت‌شده می‌تواند مناسب‌تر باشد. در سال‌های اخیر، یادگیری ماشین و طراحی مولد به‌عنوان دو روش نوین در بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها مطرح شده‌اند که تأثیرات چشمگیری در بهبود کارایی و کاهش مصرف انرژی دارند. این تکنیک‌ها به‌ویژه در پروژه‌های پیچیده و بزرگ به‌کار گرفته می‌شوند و توانسته‌اند تحولی در فرایندهای طراحی و بهینه‌سازی ایجاد کنند. هر یک از این روش‌ها به‌طور مجزا و در ترکیب با یکدیگر قابلیت‌هایی دارند که به طراحان و مهندسان کمک می‌کند تا راه‌حل‌های بهینه‌تر و دقیق‌تری برای مصرف انرژی در ساختمان‌ها ارائه دهند.

یادگیری ماشین به‌ویژه در قالب یادگیری نظارت‌شده و یادگیری عمیق به‌طور فزاینده‌ای در بهینه‌سازی مصرف انرژی به‌کار می‌رود. این روش‌ها با استفاده از داده‌های تجربی و تاریخی، قادر به پیش‌بینی الگوهای مصرف انرژی و شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های انرژی در ساختمان‌ها هستند. ازآنجاکه یادگیری ماشین به‌طور مداوم از داده‌های جدید بهره‌گیری می‌کند، توانایی پیش‌بینی دقیق‌تری از نیازهای انرژی در آینده را فراهم می‌آورد و به‌طور خودکار تنظیمات سیستم‌های انرژی مانند گرمایش، سرمایش و تهویهٔ مطبوع را بهینه می‌کند. این ابزار به‌ویژه در پروژه‌هایی که نیاز به پیش‌بینی دقیق مصرف انرژی در طول زمان دارند، بسیار مفید است. همچنین یادگیری ماشین می‌تواند به‌صورت پویا و در زمان واقعی، مصرف انرژی را بهینه کرده و به سیستم‌ها کمک کند تا با کمترین مصرف، عملکرد بهینه‌ای داشته باشند.

از سوی دیگر، طراحی مولد به‌عنوان روشی پیشرفته در فرایندهای طراحی ساختمان‌ها، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی‌های پیچیده برای یافتن بهترینِ راه‌حل‌های طراحی را امکان‌پذیر می‌سازد. این روش معمولاً با استفاده از نرم‌افزارهای پارامتریک مانند نرم‌افزار راینو و پلاگین گرس‌هاپر انجام می‌شود که به طراحان این امکان را می‌دهند به‌طور پویا و به‌راحتی پارامترهای مختلف طراحی را تغییر دهند و تأثیر آن‌ها را بر مصرف انرژی و عملکرد ساختمان مشاهده کنند. طراحی مولد این امکان را می‌دهد که طراحان به‌طور مؤثر و سریع‌تر از طراحی‌های سنتی، بهینه‌ترین راه‌حل‌ها را برای طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف انرژی ارائه دهند. این رویکرد با تغییرات در پارامترهای مختلف مانند فرم ساختمان، محل قرارگیری پنجره‌ها و انتخاب مواد ساختمانی، به‌دست‌آوردن بهترین ترکیب برای بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند. ترکیب یادگیری ماشین و طراحی مولد می‌تواند نتایج بسیار قوی‌تری در بهینه‌سازی انرژی داشته باشد.

درنهایت، ادغام یادگیری ماشین و طراحی مولد در پروژه‌های واقعی می‌تواند به طراحی ساختمان‌هایی منجر شود که نه‌تنها از نظر

زیبایی‌شناسی و عملکردی مؤثر باشند، بلکه مصرف انرژی آن‌ها نیز به حداقل برسد.

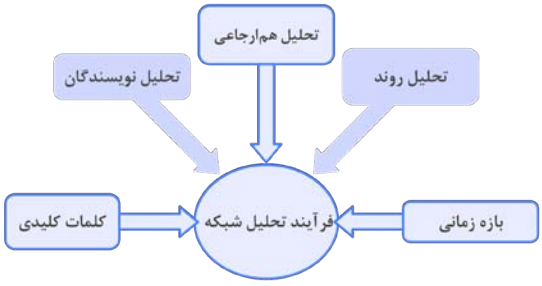
در تصویر ۹ داده‌های گردآوری‌شده نشان‌دهندهٔ توزیع گستردهٔ تکنیک‌های متنوع و میزان تأثیرگذاری آن‌ها در مقالات علمی این حوزه است. این دسته‌بندی براساس نوع الگوریتم ویژگی‌های تکنیک‌های استفاده‌شده و تأثیرگذاری آن‌ها در حوزه‌های کاربردی صورت گرفته است. همان‌طور که در جدول‌های ارائه‌شده مشخص است، تکنیک‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک، الگوریتم‌های تکاملی و هوش ازدحامی بیشترین فراوانی استفاده و محبوبیت را در میان پژوهش‌های علمی دارند. تصویر ۱۰ روش‌های بهینه‌سازی براساس هم‌نشینی کلیداوژه‌ها و فراوانی آن در پژوهش‌ها را نشان می‌دهد. یکی از نکات مهم در این یافته‌ها، اهمیت شبیه‌سازی مبتنی‌بر داده‌های واقعی است که به‌دلیل نقش آن در بهبود دقت و کاربردی‌تر کردن تحلیل‌ها، به‌طور گسترده‌ای در ادبیات علمی به‌کار رفته است. الگوریتم‌های هوش ازدحامی، مانند ازدحام ذرات، نیز نقش کلیدی در حل مسائل پیچیده مرتبط با شبیه‌سازی دارد. این الگوریتم‌ها با الهام از رفتارهای طبیعی و تعامل‌های اجتماعی، توانسته‌اند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در جست‌وجوی راه‌حل‌های بهینه عمل کنند. همچنین، تکنیک‌های جست‌وجوی محلی، نظیر جست‌وجوی محلی هدایت‌شده، هرچند فراوانی استفادهٔ کمتری نسبت به الگوریتم‌های تکاملی داشته‌اند، اما در حل مسائل محلی و هدفمند موفق بوده‌اند. تکنیک‌های بهینه‌سازی عددی نیز همچنان به‌عنوان یکی از ابزارهای اساسی در این حوزه مطرح هستند. هرچند روش‌هایی مانند بهینه‌سازی هندسی یا جست‌وجوی متنوع کمتر در پژوهش‌ها استفاده شده‌اند، این امر ممکن است به‌دلیل جایگزینی آن‌ها با روش‌های پیشرفته‌تر یا محدودیت کاربردی آن‌ها در مسائل پیچیده باشد. همچنین، تحلیل مقالات علمی نشان می‌دهد تکنیک‌های مبتنی‌بر الگوریتم‌های ژنتیک و تکاملی به‌دلیل چهارچوب‌های ریاضیاتی و تئوری‌های قوی که عملکرد آن‌ها را تضمین می‌کند، بیشترین تأثیرگذاری را در بهینه‌سازی انرژی ساختمان‌ها داشته‌اند. درنهایت، یافته‌های این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهند تکنیک‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در حوزهٔ انرژی ساختمان‌ها تنوع بالایی دارند و هر یک از این روش‌ها بسته به نوع مسئله و اهداف مطالعاتی، قابلیت‌های منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهند. این تحلیل‌ها می‌توانند الهام‌بخش پژوهش‌های آتی در طراحی و توسعهٔ تکنیک‌های پیشرفته‌تر و کاربردی‌تر برای بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها باشند. مطالعه و بررسی مضامین فرعی مرتبط با بهینه‌سازی انرژی ساختمان‌ها، نشان‌دهندهٔ تأکید ویژهٔ پژوهش‌ها بر رویکردهای چندگانه و بین‌رشته‌ای است. الگوریتم‌های ژنتیک و تکاملی در کنار تکنیک‌های هوش مصنوعی[11] و یادگیری ماشین، سهم مهمی در توسعهٔ ابزارهای بهینه‌سازی داشته و نقش مؤثری در حل مسائل پیچیدهٔ طراحی و شبیه‌سازی ایفا کرده‌اند. این تکنیک‌ها، با استفاده از چهارچوب‌های محاسباتی پیشرفته، راه‌حل‌هایی را برای مسائل چندهدفه، مانند کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری ارائه داده‌اند.

چالش‌ها و محدودیت‌ها: استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد سیستم‌های مختلف ساختمانی کمک شایانی کند، اما در عین حال با چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی نیز مواجه است. یکی از اصلی‌ترین مشکلات، پیچیدگی‌های مدل‌سازی است. بسیاری از الگوریتم‌ها برای انجام بهینه‌سازی نیاز به مدل‌سازی دقیق و پیچیده سیستم‌های انرژی دارند که ممکن است در برخی موارد بسیار زمان‌بر و پرهزینه باشد. این امر به‌ویژه در مسائل بزرگ و پیچیده که شامل تعدادی متغیر وابسته و متقابل هستند، پیچیدگی بیشتری پیدا می‌کند. در جدول ۴، چالش‌ها و محدودیت‌های الگوریتم‌ها بیان شده است.

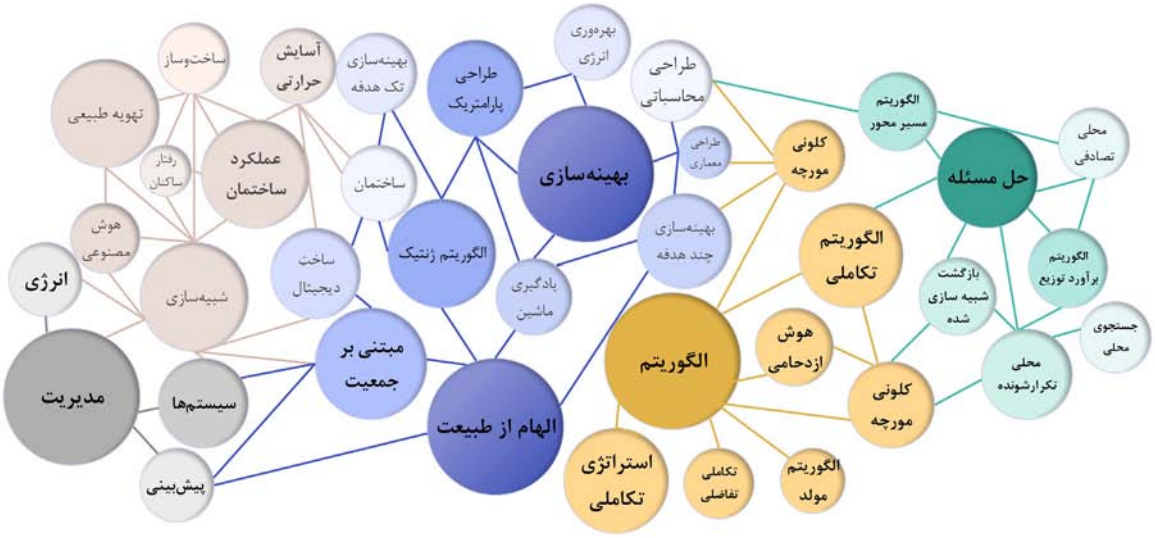
الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌ویژه در حل مسائل پیچیده و غیرخطی کارآمد هستند و نیاز به محاسبات بیشتر و داده‌های دقیق می‌تواند مانع از استفادهٔ آسان آن‌ها در پروژه‌های بزرگ و پیچیده باشد. همچنین، روش‌های مانند شبیه‌سازی مبتنی‌بر داده‌های واقعی می‌توانند دقت بالایی داشته باشند اما نیاز به داده‌های معتبر و به‌روز دارند که در پروژه‌هایی با داده‌های ناقص چالش‌برانگیز است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد روش‌های مختلف بهینه‌سازی، به‌ویژه الگوریتم‌های ژنتیک و تکاملی، نقش برجسته‌ای در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها ایفا می‌کنند. این روش‌ها به‌دلیل کارایی بالا در حل مسائل پیچیده و چندبعدی، در ادبیات به آن‌ها توجه شده است. شایان ذکر است که روش‌های مبتنی‌بر داده‌های واقعی نیز به‌عنوان ابزارهای حیاتی برای افزایش دقت و کارآمدی شبیه‌سازی‌ها در این حوزه استفاده شدند. این روندها نشان می‌دهند مطالعات مرتبط با بهینه‌سازی



تصویر ۹. فرایند تحلیل شبکهٔ علم‌سنجی. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۱۰. هم‌نشینی کلیداوژه‌ها در روش‌های بهینه‌سازی. مأخذ: نگارندگان.

جدول ۴. چالش‌ها، محدودیت‌ها و الگوریتم‌ها. مأخذ: نگارندگان.

الگوریتم	محدودیت‌ها و چالش‌ها
الگوریتم‌های ژنتیک	این الگوریتم‌ها به‌دلیل جست‌وجوی گسترده در فضای پارامترها و توانایی حل مسائل پیچیده، در مسائل بزرگ و غیرخطی بسیار مؤثر هستند. بااین‌حال، استفاده از آن‌ها زمان‌بر و محاسباتی است.
بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)	الگوریتم PSO در حل مسائل مهندسی به‌ویژه مسائل غیرخطی و پیچیده کاربرد دارد اما در مواردی که تعداد متغیرهای وابسته زیاد باشد یا الگوریتم به تنظیمات پیچیده نیاز داشته باشد، ممکن است با محدودیت مواجه شود.
تکنیک‌های جست‌وجوی محلی هدایت‌شده	این روش‌ها عمدتاً برای مسائل متمرکز و ساده‌تر مناسب هستند و در مسائل پیچیده‌تر یا مسائلی که نیاز به جست‌وجوی گسترده در فضای جواب دارند، عملکرد خوبی ندارند.
شبیه‌سازی مبتنی‌بر داده‌های واقعی	شبیه‌سازی‌های مبتنی‌بر داده‌های واقعی به‌دلیل دقت بالا در پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها بسیار کارآمد هستند اما نیاز به داده‌های دقیق و به‌روز دارند که می‌تواند محدودیت‌هایی در برخی پروژه‌ها ایجاد کند.
بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها	این روش به‌طور محدود در مسائل خاص بهینه‌سازی استفاده می‌شود و در مسائل با ابعاد بالا یا پیچیدگی‌های زیاد عملکرد کمی دارد.
روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی و تکامل تفاضلی	این روش‌ها در داده‌های موجود هیچ استفاده‌ای نداشته‌اند و احتمالاً به دلایل پیچیدگی محاسباتی یا محدودیت در ویژگی‌های مسائل، به آن‌ها کمتر توجه شده است.

انرژی ساختمان‌ها، به‌دلیل پیامدهای عملی و کاربردی مهم، محققان به آن‌ها توجه ویژه‌ای کرده‌اند. علاوه‌بر این، رشد قابل‌توجه استفاده از الگوریتم‌های هوش ازدحامی نظیر بهینه‌سازی ازدحام ذرات، نشان‌دهندهٔ جذابیت این تکنیک‌ها برای حل مسائل مرتبط با انرژی در ساختمان‌هاست. این الگوریتم‌ها با بهره‌گیری از رفتارهای طبیعی و تعاملی، توانایی در جست‌وجوی فضای راه‌حل‌های بهینه از خود نشان داده‌اند. همچنین، به تکنیک‌های جست‌وجوی محلی مانند جست‌وجوی محلی هدایت‌شده نیز در مسائل خاص و محلی توجه شده است، هرچند استفاده کمتری در مقایسه با الگوریتم‌های تکاملی داشته‌اند. در این مطالعه، تلاش شد تا روند استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در پژوهش‌های علمی این حوزه به‌طور جامع تحلیل شود. تحلیل‌ها نشان می‌دهند افزایش چشمگیر تعداد مطالعات در این زمینه، شناسایی و دسته‌بندی روش‌های بهینه‌سازی را به یک چالش تبدیل کرده است. الگوریتم‌های ژنتیک با بالاترین فراوانی استفاده، جایگاه ویژه‌ای میان تکنیک‌های بهینه‌سازی دارد و به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای تحلیل و بهینه‌سازی مسائل چندهدفه است. روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی با زیرمجموعه‌های متنوع و پیچیدگی‌های متعدد، نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر هستند.

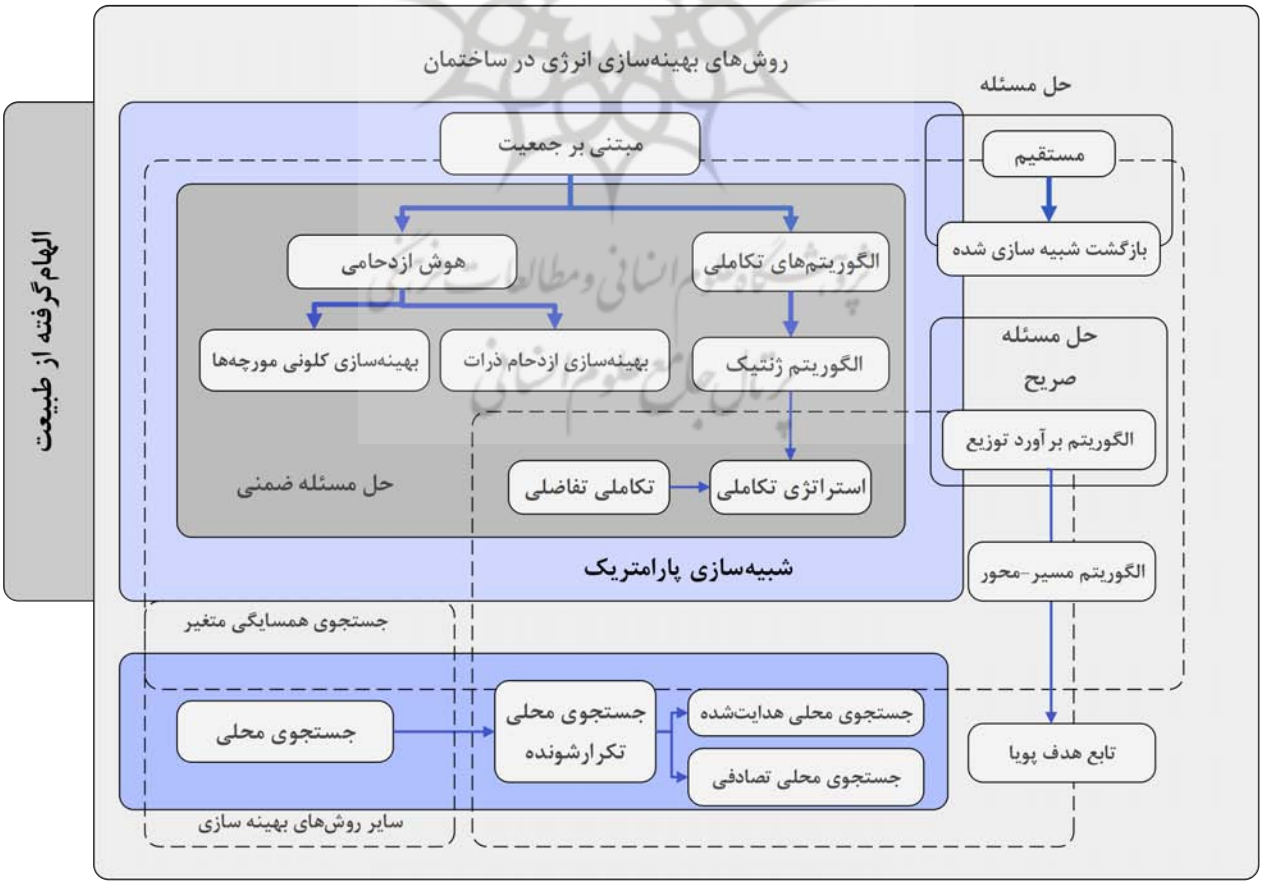
از سوی دیگر، ارائهٔ راه‌حل‌های جدید و کارآمد، نیازمند ترکیب داده‌های واقعی، تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته و روش‌های هوشمند است. به‌طور کلی، این مطالعه به محققان توصیه می‌کند در پژوهش‌های آینده، علاوه‌بر توجه به جنبه‌های خاص و محلی روش‌های بهینه‌سازی، فرایندهای حل مسئلهٔ بهینه‌سازی متناسب با مسئله را نیز درنظر بگیرند و توجه به تطابق داده‌ها با شرایط واقعی و بهره‌گیری از رویکردهای میان‌رشته‌ای باشد.

ترکیب این راهکارها با تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته می‌تواند موجب ارتقاء کیفیت و کارایی مطالعات شود و درنهایت به حل مسائل پیچیده در زمینه‌های مختلف، ازجمله بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها کمک کند. این پژوهش سعی دارد با ارائهٔ یک دیدگاه جامع و ساختاریافته، الهام‌بخش پژوهش‌های آینده در این حوزه باشد و بتواند راه را برای طراحی الگوریتم‌های بهینه‌تر و کاربردی‌تر هموار کند. این رویکردها می‌توانند به توسعهٔ ساختمان‌های پایدارتر، کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد سیستم‌های ساختمانی در دنیای واقعی کمک نمایند. علاوه‌بر این، نتایج این پژوهش به طراحی ابزارهایی منجر شود که در کنار کارآمدی بالا، قابلیت مقیاس‌پذیری برای حل مسائل گسترده‌تر و پیچیده‌تر را داشته باشند.

آیندهٔ پژوهش: با توجه به چالش‌ها و محدودیت‌هایی که در استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها وجود دارد، مسیرهای متعددی برای پیشرفت و بهبود این روش‌ها در آینده قابل تصور است. یکی از این مسیرها، توسعهٔ الگوریتم‌های هوشمندتر است که قادر به مدیریت بهینهٔ انرژی در شرایط پیچیده‌تر و مقیاس‌های بزرگ‌تر باشند. استفاده از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی مصرف انرژی و بهینه‌سازی آن می‌تواند به ارتقای دقت و کارایی الگوریتم‌ها کمک کند و امکان پیش‌بینی رفتار سیستم‌های انرژی ساختمان‌ها را در شرایط مختلف فراهم کند. یکپارچگی سیستم‌ها یکی دیگر از جنبه‌های مهمی است که در آینده می‌تواند بهبود یابد. ایجاد سیستم‌های بهینه‌سازی یکپارچه که به راحتی با سیستم‌های انرژی موجود در ساختمان‌ها هماهنگ شوند، می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و پیچیدگی‌ها کمک کند. این سیستم‌ها باید قادر باشند داده‌های مختلف از سیستم‌ها تهویه، روشنایی، سرمایش و گرمایش و سایر بخش‌های ساختمان را جمع‌آوری کرده و به صورت هماهنگ و بهینه مدیریت کنند. در تصویر ۱۱ مدل مفهومی از دسته‌بندی روش‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان مشخص شده است.

پی‌نوشت‌ها

۱. /Optimization ۲. /Genetic Algorithms ۳. /Particle Swarm Optimization ۴. /Hybrid Methods ۵. /Systematic Review ۶. /bibliometric ۷. /Simulation Tools ۸. /Compensatory Search ۹. /Expert-Based Optimization ۱۰. Simulation-Based ۱۱. /Optimization Engine ۱۲. /Algorithm ۱۳. /Wang ۱۴. /Bebruck ۱۵. /Castro-Lacouture ۱۶. /Machine Learning ۱۷. /Evolutionary Algorithms ۱۸. /Thermal Simulation ۱۹. /Architectural Design Process ۲۰. Multi-Objective Optimization Meth



تصویر ۱۱. دسته‌بندی در روش‌های بهینه‌سازی. مأخذ: نگارندگان.

فهرست منابع

• Al-Saadi, S. N., & Al-Jabri, K. S. (2020). Optimization of envelope design for housing in hot climates using a genetic algorithm (GA) computational approach. *Journal of Building Engineering*, *32*, 101712. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101712

• Bragadin, M. A., Pozzi, L., & Kähkönen, K. (2022). *Multi-objective Genetic Algorithm for the Time, Cost, and Quality Trade-Off Analysis in Construction Projects. In Nordic Conference on Construction Economics and Organization* (pp. 193-207). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25498-7_14

• Bui, D. K., Nguyen, T. N., Ghazlan, A., Ngo, N. T., & Ngo, T. D. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach. *Applied Energy*, *265*, 114797. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797

• Da Silva, M. A., Garcia, R. D. P., & Carlo, J. C. (2024). Multi-objective optimization algorithms for building performance assessment–A benchmark. *International Journal of Architectural Computing*. https://doi.org/10.1177/14780771241296263

• Deng, X., He, D., & Qu, L. (2024). A novel hybrid algorithm based on arithmetic optimization algorithm and particle swarm optimization for global optimization problems. *Journal of Supercomputing*, *80*(7), 8857-8897. https://doi.org/10.1007/s11227-023-05773-4

• Duhirwe, P. N., Ngarambe, J., & Yun, G. Y. (2023). Energy-efficient virtual sensor-based deep reinforcement learning control of indoor CO2 in a kindergarten. *Frontiers of Architectural Research*, *12*(2), 394-409. https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.10.003

• Feng, X., Chen, Y., Zhang, J., Cho, H., & Shi, X. (2021). *Rubik's Cube Topology Based Particle Swarm Algorithm for Bilevel Building Energy Transaction. In Energy Sustainability* (Vol. 84881, p. V001T08A002). American Society of Mechanical Engineers. https://asmedigitalcollection.asme.org/ES/proceedings-abstract/ES2021/V001T08A002/1114919

• Ghaderi Dehkordi, M., & Nedaei Tousi, S. (2024). A Sustainable Framework for Intervention and Heritage-Led Regeneration: A Systematic Review. *Bagh-e Nazar*, *21*(131), 35-48. https://doi.org/10.22034/bagh.2024.399296.5382

• Ghasemi Nasab, M., Moulaii, M., & Pilechiha, P. (2021). Accurate simulation of new glazed facades with emphasis on daylighting and energy optimization (Case study: office building in Hamedan). *Sustainable Architecture and Urban Design*, *9*(2), 175-163. https://doi.org/10.22061/jsaud.2021.7529.1811

• Gonidakis, D. N., Frangedaki, E. I., & Lagaros, N. D. (2024). Optimizing Daylight Performance of Digital Fabricated Adobe Walls. *Architecture*, *4*(3), 515-540. https://doi.org/10.3390/architecture4030028

• Güney, H. (2023). Feature selectionintegrated classifier optimisation algorithm for network intrusion detection. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, *35*(23), e7807. https://doi.org/10.1002/cpe.7807

• Hong, W. K., & Le, T. A. (2023). ANN-based optimized design of doubly reinforced rectangular concrete beams based on multi-objective functions. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *22*(3), 1413-1429. https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2085720

• Hong, W. K., & Nguyen, D. H. (2023). Pareto frontier for steel-reinforced concrete beam developed based on ANN-based Hong-Lagrange algorithm. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *22*(6), 3535-3551. https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2193621

• Hong, W. K., & Pham, T. D. (2024). An ANN-based Hong-Lagrange algorithm (ANN-based HLA) for auto design-based building application (ABBA) with prestressed precast piperack frame. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *23*(2), 649-686. https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2244575

• Ikeda, S., & Nagai, T. (2021). A novel optimization method combining metaheuristics and machine learning for daily optimal operations in building energy and storage systems. *Applied Energy*, *289*, 116716. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116716

• Ismail, Z. A. (2024). Machine learning applications for a better demand controlled ventilation system experience in buildings: a review. *Open House International*, *49*(3), 444-467. https://doi.org/10.1108/OHI-03-2023-0065

• Khodadadi, A. (2023). A Generative design exploration methodology for integration of structural, environmental, and user agencies in an early design stage. *International Journal of Architectural Computing*, *21*(4), 757-780. https://doi.org/10.1177/14780771231183176

• Li, Z., Lin, B., Zheng, S., Liu, Y., Wang, Z., & Dai, J. (2020). A review of operational energy consumption calculation method for urban buildings. In *Building Simulation* (Vol. 13, pp. 739-751). Tsinghua University Press. https://doi.org/10.1007/s12273-020-0619-0

• Mathebula, N. O., Thango, B. A., & Okojie, D. E. (2024). Particle swarm optimisation algorithm-based renewable energy source management for industrial applications: an oil refinery case study. *Energies*, *17*(16), 3929. https://www.mdpi.com/1996-1073/17/16/3929

• Mohan, P., Neelakandan, S., Mardani, A., Maurya, S., Arulkumar, N., & Thangaraj, K. (2023). Eagle strategy arithmetic optimisation algorithm with optimal deep convolutional forest based fintech application for hyper-automation. *Enterprise Information Systems*, *17*(10), 2188123. https://doi.org/10.1080/17517575.2023.2188123

• Shivaprasad More, P., Saini, B. S., & Sharma, R. K. (2023). Optimisation algorithm in health care: review on the State-of-the-Art models. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 1-24. https://doi.org/10.1080/0952813x.2023.2217813

• Mousavi, S., Gheibi, M., Wacławek, S., Smith, N. R., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Behzadian, K. (2023). Low-energy residential building optimisation for energy and comfort enhancement in semi-arid climate conditions. *Energy Conversion and Management*, *291*, 117264. https://

doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117264

• Najafi, G. S., Gorji Mahlabani, Y., & Pilechiha, P. (2023). Sensitivity analysis and optimization of building geometry with energy-daylight efficiency approach. *Sustainable Architecture and Urban Design, 11*(1), 45-58. https://doi.org/10.22061/jsaud.2022.8596.1992

• Nouri, L., Taghizadeh, K., & Alaghmandan, M. (2023). Development of algorithmic applications in architecture: a review and analysis of L-systems. *Bagh-e Nazar, 19*(116), 5-22. https://doi.org/10.22034/bagh.2022.327468.5119

• Noorollahi, Y., Barabadi, P., Taherahmadi, J., & Abbasizade, F. (2024). Multi-objective optimization of energy demand and net zero energy building design based on climatic conditions (Case study: Iran). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-16. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06059-9

• Ogar, V. N., Hussain, S., & Gamage, K. A. (2023). Load frequency control using the particle swarm optimisation algorithm and PID controller for effective monitoring of transmission line. *Energies, 16*(15), 5748. https://www.mdpi.com/1996-1073/16/15/5748

• Olave, D. C. (2022). From efficiency to exhaustion: computer-aided architecture at the madrid calculation center (1968–1973). *Technology Architecture Design, 6*(1), 59-67. https://doi.org/10.1080/24751448.2022.2040304

• Omrany, H., Soebarto, V., & Ghaffarianhoseini, A. (2022). Rethinking the concept of building energy rating system in Australia: A pathway to life-cycle net-zero energy building design. *Architectural Science Review, 65*(1), 42-56. https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1911783

• Quang, T. V., & Phuong, N. L. (2024). Using Deep Learning to Optimize HVAC Systems in Residential Buildings. *Journal of Green Building, 19*(1), 29-50. https://doi.org/10.3992/jgb.19.1.29

• Rabani, M., Madessa, H. B., & Nord, N. (2021). Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 44*, 101020. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101020

• Rachmawati, T. S. N., Khant, L. P., Lim, J., Lee, J., & Kim, S. (2024). Optimization of lap splice positions for near-zero rebar cutting waste in diaphragm walls using special-length-priority algorithms. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 23*(6), 1933-1950. https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2278881

• Rahnamayiezekavat, P., Wang, D., Chai, J., Moon, S., Rashidi, M., & Wang, X. (2024). Automated pavement marking integrity assessment using a UAV platform–a test case of public parking. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1-12. https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2329358

• Saffari, A., Zahiri, S. H., & Khishe, M. (2023). Fuzzy whale optimisation algorithm: a new hybrid approach for automatic sonar target recognition. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 35*(2), 309-325. https://doi.org/10.1080/0952813x.2021.1960639

• Sharma, I., & Kumar, V. (2022). Multi-objective tunicate search optimisation algorithm for numerical problems. *International Journal of Intelligent Engineering Informatics, 10*(2), 119-144. https://doi.org/10.1504/ijiei.2022.125859

• She, C., Jia, R., Hu, B. N., Zheng, Z. K., Xu, Y. P., & Rodriguez, D. (2021). Life cycle cost and life cycle energy in zero-energy building by multi-objective optimization. *Energy Reports, 7*, 5612-5626. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.198

• Su, C. J., & Zhao, T. (2024). Collaborative optimization of thermal conductivity distribution and heat source layout based on Bayesian optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 224, 125324. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125324

• Tajik, R., Soltanmohammadlou, S., Kianfar, A., Masera, G., & Hoque, S. (2024). A case study: intelligent shading retrofit to existing home-office using multi-objective optimization. *Journal of Green Building, 19*(1), 123-156. https://doi.org/10.3992/jgb.19.1.123\

• Wang, J., Wang, Y., Qiu, D., Su, H., Strbac, G., & Gao, Z. (2025). Resilient energy management of a multi-energy building under low-temperature district heating: A deep reinforcement learning approach. *Applied Energy*, 378, 124780. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124780

• Wang, A., Xiao, Y., Liu, C., Zhao, Y., & Sun, S. (2024a). Multi-objective optimization of building energy consumption and thermal comfort based on SVR-NSGA-II. *Case Studies in Thermal Engineering, 63*, 105368. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105368

• Wang, G., Mukhtar, A., Moayedi, H., Khalilpoor, N., & Tt, Q. (2024b). Application and evaluation of the evolutionary algorithms combined with conventional neural network to determine the building energy consumption of the residential sector. *Energy, 298*, 131312. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131312

• Wang, Z., Peura, H., & Wiesemann, W. (2024c). Randomized assortment optimization. *Operations Research, 72*(5), 2042-2060. https://doi.org/10.1287/opre.2022.0129

• Wen, Y., Ye, W., & Yu, G. (2024). A Hybrid Multi-Objective Model for Multi-Story Warehouse *Design. CAADRIA, 1*, 283-292.

• Xu, N., Guan, K., & Wang, P. (2024). Improving access to urban parks through public transit optimization. *Frontiers of Architectural Research, 13*(3), 575-592. https://doi.org/10.1016/j.foar.223.12.011

• Yang, J., Hua, W., Xia, T., Li, Q., Shi, H., & Zhou, X. (2024). Design of Public Rental Settlements Based on Green and Low-Carbon Research: Example of Course Design for a Senior Design Class. *Journal of Green Building, 19*(2), 133-162. https://doi.org/10.3992/jgb.19.2.133

• Yu, K., Bao, Q., Xu, H., Cao, G., & Xia, S. (2024). An extreme learning machine stock price prediction algorithm based on the optimisation of the Crown Porcupine Optimisation Algorithm with an adaptive bandwidth kernel function density estimation algorithm. In *Proceedings of the International Conference on Digital Economy*, Blockchain and Artificial Intelligence (pp. 116-121). https://doi.org/10.1145/3700058.3700077

• Yue, L., Wang, H., Mumtaz, J., Rauf, M., & Li, Z. (2023). Energy-

efficient scheduling of a two-stage flexible printed circuit board flow shop using a hybrid Pareto spider monkey optimisation algorithm. *Journal of Industrial Information Integration, 31*, 100412. https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100412

• Zhan, X., Zhang, W., Chen, R., Bai, Y., Wang, J., & Deng, G. (2025). Non-dominated sorting genetic algorithm-II: A multi-objective optimization method for building renovations with half-life cycle and economic costs. *Building and Environment, 267*, 112155. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112155

• Zhang, H., Cui, Y., Cai, H., & Chen, Z. (2024a). Optimization and prediction of office building shading devices for energy, daylight, and view consideration using genetic and BO-LGBM algorithms. *Energy and Buildings, 324*, 114939. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114939

• Zhang, J., Zheng, H., & Wu, B. (2024b). Multi-objective optimization of distributed photovoltaics on building surfaces from visual impact. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1-18. https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2397097

• Zhang, R., Xu, X., Liu, K., Kong, L., Wang, X., Zhao, L., & Abuduwayiti, A. (2024c). Does architectural design require single-objective or multi-objective optimisation? A critical choice with a comparative study between model-based algorithms and genetic algorithms. *Frontiers of Architectural Research, 13*(5), 1079-1094. https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.03.010

• Zhu, Y., Xu, W., Luo, W., Yang, M., Chen, H., & Liu, Y. (2025). Application of hybrid machine learning algorithm in multi-objective optimization of green building energy efficiency. *Energy, 316*, 133581. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133581

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نحوهٔ ارجاع به این مقاله:

جاوید، پریسا؛ نیک‌قدم، نیلوفر؛ کریم‌پور، علیرضا و صابرنژاد، ژاله. (۱۴۰۴). ارزیابی سیستماتیک علم‌سنجی در روش‌های بهینه‌سازی انرژی در ساختمان. *باغ نظر*، ۲۲(۱۴۲)، ۴۱-۵۶.

DOI: 10.22034/BAGH.2025.490974.5717
URL:https://www.bagh-sj.com/article_215446.html