Archive of SID

ISSN: 2538-2594; Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2020;10(3):205-217

Optimization Methods and Algorithms in Architectural and Urban Design, Basic Mathematical Solutions

ARTICLE INFO

Article Type
Anatical Review

Authors
Pilechiha P. *[1] *PhD*

How to cite this article
Pilechiha P. Optimization Methods and Algorithms in Architectural and Urban Design, Basic Mathematical Solutions. Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2020-;10(3):205-217.

[1]Architecture Department, Kowsar Higher Education, Qazvin, Iran

Correspondence
Address: Architecture Department, Kowsar Higher Education, Rahahan Street, Qazvin, Iran.
Postal Code: 3416886837
Phone: -
Fax:-
p.pilechiha@modares.ac.ir

Article History
Received: April 16, 2020
Accepted: April 25, 2020
ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

Building design is a quite complex activity where a team of designers working on diverse and contradictory parameters to make the balance between them. Because of this complexity, building performance simulation tools were developed and subsequently, the use of optimization methods, generally, as a decision-making tool is started.
The current study is a review of the optimization methods and algorithms which are used in the design of the building and trying to discover the cause of their choice, practical issues, and demonstrate their capabilities and introduce key attributes. The lack of knowledge of architects about these issues and their backwardness compared to other disciplines related to design and maintain buildings double its importance.
The most important basic rules to choose optimization strategy are classification algorithms and find suitable one for a specific problem. Several research papers in this area are investigated and according to them, optimization algorithms are divided into three categories including evolutionary algorithms, direct search (derivatives free), and the hybrid. The findings show that evolutionary algorithms and especially genetic algorithm application are more popular than other algorithms. The most study objectives to optimize are the environmental impact, the cost of initial investment, operating costs, and comfort criteria. In these studies, the design variables are construction materials, form and orientation of the building, cast shadows, and HVAC. In addition, the number of research papers that have used this algorithm to optimize the design of the building, than the number of articles on optimizing building control, is very low.

Keywords Multi-Objective Optimization; Optimization Algorithm; Simulation Tools; Genetics

CITATION LINKS

[1] Optimisation ... [2] Optimization ... [3] A comparison ... [4] Structural and ... [5] Design optimisation for ... [6] Optimizing the ... [7] Optimization of ... [8] Application of ... [9] Minimisation of life ... [10] Recent advances ... [11] Computational ... [12] kelidestan ... [13] Multi-objective ... [14] Sustainable land use ... [15] Optimization of the ... [16] Multicriteria ... [17] A multicriteria ... [18] Optimization of ... [19] Computer ... [20] Optimization model for ... [21] Architectural ... [22] Computer-aided ... [23] Method for ... [24] Optimization of ... [25] Evolutionary algorithms ... [26] Evolutionary computation ... [27] Evolution by natural ... [28] Adaptation in natural ... [29] The simultaneous ... [30] Low-energy ... [31] Optimization of Mediterranean ... [32] Optimization ... [33] Genetic ... [34] Use of ... [35] Optimizing building form for energy performance ... [36] The use of genetic ... [37] Genetic-algorithm ... [38] Design explorations of ... [39] Multiobjective ... [40] Multi-objective optimization ... [41] Development of a ... [42] A case study exploring ... [43] A genetic algorithm ... [44] Thermal optimization of ... [45] Applying multi-objective ... [46] Design ... [47] A design optimization tool based ... [48] Optimization ... [49] Intelligence through ... [50] Genetic ... [51] HVAC system ... [52] Design optimization ... [53] Probabilistic model ... [54] Passive solar building ... [55] Evolutionary algorithms ... [56] Adapting arbitrary normal ... [57] A hybrid CMA-ES and HDE ... [58] Differential ... [59] Particle ... [60] Multi-objective optimization of ... [61] Particle swarm ... [62] Influence of ... [63] Optimisation of curtain wall façades for office ... [64] A new heuristic ... [65] Harmony search as a metaheuristic ... [66] Hybridizing ... [67] A hybrid harmony ... [68] Ant colony optimization ... [69] Dynamic ant ... [70] Ant system: Optimization ... [71] Optimization by ... [72] Thermodynamical ... [73] Simulated ... [74] Optimization ... [75] PDS: Direct search ... [76] "Direct Search" ... [77] Direct search ... [78] Multivariate optimization ... [79] Linear ... [80] A simplex method ... [81] Optimization ... [82] Multi-parameter ... [83] Nonlinear constrained ... [84] Optimising ... [85] Numerical ... [86] Uncertainty-weighted ... [87] A hybrid ... [88] Combination of ... [89] Design optimization ... [90] A comparison ... [91] Program design ... [92] Swarm intelligence ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در طراحی معماری و شهرسازی، راهکارهای ریاضی پایه

پیمان پیله‌چی‌ها* PhD

گروه معماری، موسسه آموزش عالی کوثر، قزوین، ایران

چکیده

طراحی ساختمان فعالیتی کاملاً پیچیده و چندوجهی است که در آن تیمی از طراحان تلاش می‌کنند بین پارامترهایی متنوع و متضاد که خود تابعی از قیدهای متنوع هستند تعادل برقرار کنند. به‌دلیل همین پیچیدگی، ابزارهای شبیه‌سازی عملکرد ساختمان ابداع شده‌اند و به دنبال آن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، عموماً به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری آغاز شده است.

پژوهش حاضر مروری بر روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در طراحی ساختمان است و تلاش می‌کند تا علت انتخاب آنها را کشف کند، مسایل عملی و قابلیت‌های آنها را نشان دهد و خصوصیات کلیدی آنها را معرفی نماید. عدم شناخت معماران نسبت به این موضوعات و عقب‌ماندگی آنان نسبت به سایر رشته‌های مربوط به طراحی و نگهداری ساختمان، اهمیت موضوع را دوچندان می‌کند.

مهم‌ترین اصل برای انتخاب استراتژی بهینه‌سازی مناسب، طبقه‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و همچنین انتخاب الگوریتم مناسب برای یک مساله مشخص است. به همین دلیل پژوهش‌های متعددی در این حوزه بررسی شده‌اند و براساس آن، الگوریتم‌های بهینه‌سازی طراحی معماری به سه دسته تکاملی، جست‌وجوی مستقیم و ترکیبی تقسیم‌بندی شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد الگوریتم‌های تکاملی و به‌خصوص الگوریتم ژنتیک کاربرد بیشتری از سایر الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی داشته است. در این پژوهش‌ها متغیرهای کلی طراحی نیز مصالح ساختمانی، فرم و جهت ساختمان، طراحی و ساختار سایه‌اندازی و نیز سیستم تهویه متبوع، بوده‌اند. در ضمن، تعداد مقالات پژوهشی که از این الگوریتم‌ها برای بهینه‌کردن طراحی ساختمان استفاده کرده‌اند، هنوز در مقابل تعداد مقاله‌های بهینه‌سازی کنترل ساختمان، خیلی کم است.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم بهینه‌سازی، ابزار شبیه‌سازی، ژنتیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

*نویسنده مسئول: p.pilechiha@modares.ac.ir

مقدمه

تا به امروز پژوهشگران در علوم مختلف ابزارهای شبیه‌سازی عملکرد ساختمان را به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار داده‌اند، اما تنها حدود یک دهه است که استفاده از این ابزارها در فرآیند طراحی معماری شروع شده است. دلایل زیادی برای این تاخیر وجود دارد که از آن جمله می‌توان به پیچیدگی استفاده از این ابزارها، نیاز به کسب مهارت‌های ضروری، هزینه‌های وابسته به آنها، عدم قطعیت در پاسخ‌دهی و احساس در مضیقه قرارگرفتن طراحان به‌واسطه محدودیت ابزارها اشاره کرد.

امروزه تعداد زیادی ابزار شبیه‌سازی عملکرد ساختمان وجود دارند که دارای محیط کاربری مناسبی هستند و مطالب آموزشی زیادی درباره آنها موجود است. با استفاده از این ابزارها، طراحان پس از مشخص‌کردن تعدادی پارامتر تصمیم‌گیری، می‌توانند طرح‌های جدیدی را که تا پیش از این به روش‌های سنتی طراحی قابل دستیابی نبودند، اکتشاف کنند. براساس این قابلیت، قوانین طراحی ابنیه در اروپا به سمت اصلاح آیین‌نامه‌های ملی انرژی در ساختمان رفته است تا رویکرد محاسباتی پیچیده‌تری را ترویج کند. علت این تصمیم‌گیری این بوده است که در بیشتر موارد، صرف تطابق طراحی با آیین‌نامه‌ها، بهینه‌بودن مصرف انرژی آن ساختمان را تضمین نمی‌کرده است.

بنابراین مطالعاتی که به دنبال بهینه‌سازی تاثیر پارامترهایی مختلف بر طراحی ساختمان هستند، از آنالیز مقداری استفاده می‌کنند که طبیعتاً نیازمند شبیه‌سازی ساختمان به‌صورت کامل است. اما شبیه‌سازی‌های کامل از نظر محاسباتی پرهزینه هستند و از تکنیک‌های خشک جبری برای ارزیابی تمامی آلترناتیوهای ممکن استفاده می‌کنند. بنابراین این نیاز حس شده است که راهی برای کشف سریع و پربازده آلترناتیوهای طراحی پیدا شود تا استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی بیشتر رواج یابد.

قابل ذکر است که در انتقال مشکلات حوزه طراحی در دنیای واقعی، به حوزه ریاضی محدودیت‌هایی دارد. در ضمن الگوریتم‌هایی بهینه‌سازی که عموماً برای حل مسایل ساختمانی به کار گرفته می‌شوند، با اطمینان نمی‌توانند به یافتن پاسخ بهینه نائل شوند. با این وجود، استفاده از این الگوریتم‌ها در طراحی در مقایسه با روش‌های طراحی متداول که از بهینه‌سازی استفاده نمی‌کنند، شانس یافتن عملکرد بهتر را افزایش می‌دهد. بنابراین برای اینکه بتوان از روش‌های بهینه‌سازی به‌طور موثری در حل مسایل طراحی استفاده کرد فهم نقاط قوت و ضعف آنها امری حیاتی است.

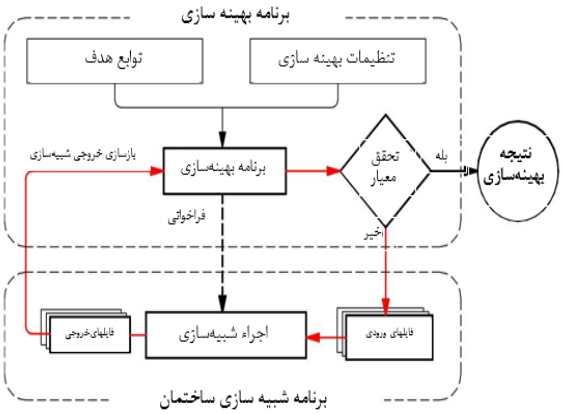
واژه‌شناسی

واژه بهینه‌سازی اغلب به فرآیند یا فرآیندهای ساخت چیزی (طراحی، سیستم و یا تصمیم) گفته می‌شود، به‌نحوی که تا حد امکان کامل، کارا و یا موثر باشد[1]. در ریاضیات، آمار و بسیاری از علوم دیگر، بهینه‌سازی ریاضی پروسه یافتن بهترین راه‌حل برای یک مشکل از میان مجموعه راه‌حل‌های موجود است. در شبیه‌سازی عملکرد ساختمان واژه بهینه‌سازی لزوماً به معنای یافتن پاسخ‌های بهینه عمومی برای یک مساله نیست، به‌دلیل اینکه این پاسخ ممکن است با توجه به طبیعت مساله و یا ویژگی‌های برنامه‌های شبیه‌سازی غیرقابل دستیابی باشد[2, 3]. بنابراین بعضی از نویسندگان از واژه بهینه‌سازی برای نشان‌دادن فرآیند بهبود تکرارشونده‌ای استفاده می‌کنند که توسط شبیه‌سازی کامپیوتری و برای یافتن پاسخ‌های کمتر از حد بهینه انجام می‌شود[4-7]. بعضی از محققان نیز از ترکیب واژه "آنالیز حساسیت" و یا روش "طراحی آزمایشی" برای بهینه‌سازی عملکرد ساختمان استفاده کرده‌اند. البته کاربرد این واژه‌ها در صورتی است که از روش‌های ریاضی برای بهینه‌سازی مساله استفاده نشود[8].

www.SID.ir

Archive of SID

روش‌های دیگری مانند روش جست‌وجوی خام و یا بهینه‌سازی متخصص‌محور نیز برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [9, 10]. به هر حال در میان متخصصان بهینه‌سازی به‌صورت کلی این امر مورد قبول واقع شده است که بهینه‌سازی، فرآیندی خودکار مبتنی بر شبیه‌سازی عددی و محاسبات ریاضی است[11]. در یک پروژه معمول بهینه‌سازی، این فرآیند معمولاً از طریق همگام‌سازی یک برنامه شبیه‌سازی کامپیوتری با یک موتور بهینه‌سازی انجام می‌شود و این موتور می‌تواند شامل یک یا چند الگوریتم بهینه‌سازی و یا استراتژی بهینه‌سازی باشد[11]. معمول‌ترین استراتژی‌ها در بهینه‌سازی‌های مبتنی بر عملکرد، در شکل ۱ به‌صورت خلاصه آمده است.



شکل ۱) چرخه بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در مطالعات عملکرد ساختمان

روش‌های بهینه‌سازی

بهینه‌سازی محاسباتی

برای حل مسایل طراحی، محققان می‌توانند از الگوریتم‌هایی استفاده کنند که با طی‌کردن تعداد مراحل مشخصی به پاسخ مساله برسند و یا از روش‌های تکرار مبنا استفاده کنند که از طریق همگرایی به یک راه‌حل خاتمه یابند و یا از روش‌های اکتشافی بهره ببرند که به پاسخ‌های تقریبی می‌رسد. در این بخش در مورد کلیت فرآیند بهینه‌سازی بحث شده است و به تشریح روش بهینه‌سازی چندهدفه پرداخته می‌شود و درنهایت اهمیت انتخاب الگوریتم مناسب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرآیند عمومی بهینه‌سازی

زمانی که یک مساله بهینه‌سازی مطرح می‌شود، قرار است که یک یا چند پارامتر بهینه شوند و بهترین مقادیر یا بهترین انتخاب ممکن برای آنها پیدا شود. برای یافتن پاسخی بهینه، باید ابتدا تعدادی پاسخ توسط الگوریتم بهینه‌سازی مورد نظر تولید شود. پس از تولید این پاسخ‌ها، از تابع هدف (هزینه) استفاده می‌شود تا مشخص شود که کدام یک از پاسخ‌های تولیدشده، به پاسخ بهینه مورد نظر، نزدیک‌تر و یا به عبارت دیگر مناسب‌تر هستند.

هنگام طراحی الگوریتم‌های بهینه‌سازی یکی از رایج‌ترین سئوالات، چگونگی تعریف تابع هزینه است. برای تعریف تابع هزینه، یک قانون کلی که باعث شود یک تابع هزینه منحصربه‌فرد تعریف شود، وجود ندارد، بلکه تنها یک روند کلی وجود دارد. بنابراین ممکن است که افراد مختلف برای یک مساله واحد، توابع هزینه متفاوتی تعریف کنند. درواقع فرد باید در مورد نحوه تعریف تابع هزینه، به‌خوبی فکر کند و یک تابع هزینه مناسب برای مساله بیابد. به‌عنوان مثال جهانگرد دوره‌گرد نمونه مناسبی از تعریف تابع هدف ارایه می‌کند[12].

مسایل بهینه‌سازی از نظر تعداد توابع هدف و معیارهای بهینه‌سازی به دو نوع شامل مسایل بهینه‌سازی تک‌هدفه و مسایل بهینه‌سازی چندهدفه تقسیم‌پذیر هستند. زمانی که بیش از یک تابع هدف برای بهینه‌سازی وجود دارد، مسایل بهینه‌سازی چندهدفه و یا چندمعیاری ظاهر می‌شوند. از آنجا که در مسایل مربوط به طراحی ساختمان، چندهدفه‌بودن شایع است (عموماً این توابع همدیگر را نقض می‌کنند)، در قسمت بعدی بر بهینه‌سازی چندهدفه تمرکز می‌شود.

بهینه‌سازی چندهدفه

عموماً در برخورد با مسایل بهینه‌سازی چندهدفه دو رویکرد وجود دارد. اولین رویکرد که از یک تابع مجموع وزن‌دهی‌شده استفاده می‌کند، در مسایلی استفاده می‌شود که در آنها هر کدام از هدف‌ها طبیعی شده‌اند. بر این اساس، وزن مشخصی به هر هدف تعلق می‌گیرد و اهداف با درنظرگرفتن وزن وابسته به خود، جمع بسته می‌شوند تا تنها یک تابع هدف باقی بماند. درواقع در این روش، مساله، به یک بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل می‌شود. الگوریتم‌های بهینه‌سازی معمول، می‌توانند برای حل چنین مساله‌ای به کار گرفته شوند اما امکان استخراج اطلاعاتی در مورد رابطه بین هدف‌های فرعی (هدف‌های وزن‌دهی‌شده) وجود ندارد. آزمودن وزن‌دهی‌های مختلف نیز به تعداد مسایل بهینه‌سازی افزوده می‌شود و درنتیجه آن، زمان پردازش افزایش می‌یابد. در این روش، منظور از وزن اهمیت است. به این شکل که معمولاً در یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه با دادن اهمیتی (وزنی) به هر یک از توابع هدف و جمع‌بستن آنها، مساله را تبدیل به یک مساله تک‌هدفه می‌کنند.

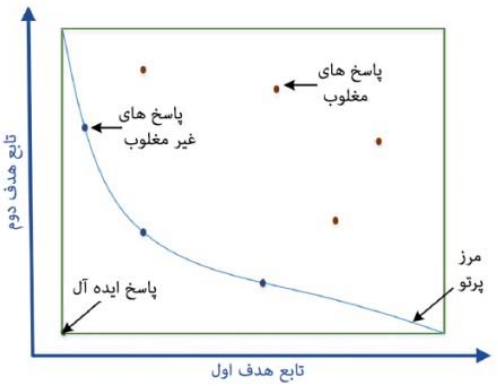
رویکرد دوم، رویکرد *پرتو* است. یک پاسخ، زمانی از نظر *پرتو*، بهینه یا غالب است که راه‌حل ممکن دیگری که بدون تضعیف‌کردن هدف دیگری، یک هدف را بهینه کند، وجود نداشته باشد. الگوریتم‌های چندهدفه در این روش، مجموعه‌ای از پاسخ‌های غیرمغلوب را می‌یابند که آنها را "مرز پرتو" می‌نامند. زمانی که مساله شامل دو هدف است، مرز پرتو می‌تواند به‌صورت یک منحنی داده شود. نمودار ۱ نمونه‌ای از مرز پرتو را برای یک مساله کمینه‌سازی با دو هدف نشان می‌دهد[13].

رویکردهای حل مسایل چندهدفه، مزیت‌ها و معایبی هم دارند. به نظر *کاو*[14] الگوریتم‌هایی که از رویکرد *پرتو* استفاده می‌کنند اگرچه طیف متنوعی از پاسخ‌ها را در نظر می‌گیرند، اما در مواردی هم اثربخشی نامناسبی دارند. روش‌های مجموع وزن‌دهی‌شده،

www.SID.ir

Archive of SID

روش‌های موثرتری هستند و روش‌های استفاده ساده‌تری دارند اما در عین حال نیاز به دانش قبلی دارند و رابطه بین توابع هدف را روشن نمی‌سازند.



نمودار ۱) نمودار پرتو در پژوهش

انتخاب الگوریتم مناسب

انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی به مساله‌ای که قرار است حل شود وابسته است. در بعضی مواقع می‌توان یک راه‌حل تحلیلی از تابع هدف به دست آورد. به‌عنوان نمونه، *آدامسکی*[15] برای بهینه‌سازی فرم بنا با پایه فرم بیضوی به دنبال این بوده است تا امکان بهینه‌سازی فرمی مفهومی و متقارن را با درنظرگیری دو معیار متضاد حداقل هزینه ساخت و حداقل تقاضای انرژی حرارتی حل کند. محاسبات با استفاده از برنامه کامپیوتری ویژه‌ای مختص این پژوهش اجرا شده است. *مارکز*[16] نیز به دنبال فرم‌یابی ساختمان با درنظرگرفتن حداقل هزینه مصالح و ساخت و همچنین حداقل هزینه گرمایشی سالیانه بوده و از دو روش تحلیلی متفاوت برای تعریف تابع هدف استفاده کرده است. دو پژوهش اخیر، به کمک ریاضی، فرم ساختمان را توصیف نموده‌اند و بهینه‌سازی را با استفاده از روش‌های عددی به نتیجه رسانده‌اند.

جایی که وسعت فضای راه‌حل کم (تعداد پاسخ‌های ممکن به مساله محدود است) و محاسبه تابع هدف سریع است، می‌توان کل این فضا را برای یافتن جواب بهینه جست‌وجو کرد. به‌عنوان نمونه، *دی‌کروز* و *رادفورد*[17] از مدل‌سازی ساده ساختمانی و برنامه‌نویسی دینامیک بهینه *پرتو* برای بهینه‌سازی بار گرمایی، نور روز، بازدهی برنامه‌ریزی و هزینه سرمایه‌گذاری در یک اداره با پلان باز استفاده کرده‌اند. در پژوهش دیگری برای بهینه‌سازی شکل و سازه ساختمان و همچنین نحوه استفاده از تجهیزات گرمایشی، از مدل ریاضی توصیف‌کننده اتلاف حرارت استفاده شده است[18]. در این پژوهش مساله طراحی ساختمان براساس دانش ریاضی توصیف شده و به روش عددی با استفاده از سیستم کامپیوتری *کاموس* حل شده است[19]. *کاسترو* و *جورج*[20] برای انتخاب مصالحی که در عین هماهنگی با محدودیت‌های بودجه و طراحی، امتیاز بیشتری را در سیستم اعتبارسنجی ساختمان سبز LEED به دست بیاورد، از مدل بهینه‌سازی عدد صحیح استفاده کرده‌اند.

میچالک و همکاران[21] مدلی برای بهینه‌سازی چیدمان فضایی در پلان ارایه کرده‌اند که در آن از روش‌های ریاضی و الگوریتم‌های مبتنی بر گرادیانت و الگوریتم‌های تکاملی در مراحل اولیه طراحی استفاده شده است. *چاکرابارتی*[22] برای بهینه‌سازی پروژه‌های توسعه شهری و خانه‌سازی، ابزار HudCAD را طراحی کرده است. این برنامه از برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده می‌کند و چهار بخش مدل‌سازی هندسی، تحلیل و بهینه‌سازی طراحی، ترسیم و مدیریت اطلاعات را در بحث استفاده از ابزارهای کامپیوتری در طراحی پوشش می‌دهد. *پترسون* و *سوندسن*[23] روش بهینه‌سازی اقتصادی خاصی را برای استفاده در مراحل اولیه طراحی خانه‌های کم‌مصرف پیشنهاد داده‌اند. روش این پژوهش استفاده از یک چارچوب مفهومی انرژی برای بیان قیدهای مساله بهینه‌سازی است تا هزینه‌های مربوط به صرفه‌جویی انرژی را به حداقل برساند. *استاوراکاکیس* و همکاران[24] از برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی برای طراحی بهینه پنجره‌ها با هدف تامین آسایش حرارتی در بناهایی با تهویه طبیعی، با کمک شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرده‌اند.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی

به‌دلیل وجود مسایل بهینه‌سازی مختلف، روش‌های بهینه‌سازی بسیار متنوعی ابداع شده‌اند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی را به‌صورت کلی می‌توان به روش‌های عمومی یا محلی، روش‌های اکتشافی یا فرااکتشافی، روش‌های مشتق مبنا یا مستقل از مشتق، روش‌های جمعیت مبنا یا مسیر مبنا، روش‌های زیست‌مبنا و غیرزیست‌مبنا، الگوریتم‌های تک‌هدفه یا چندهدفه و غیره طبقه‌بندی کرد.

این پژوهش براساس روش کار عملگر بهینه‌سازی به طبقه‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی طراحی ساختمان که بیشترین موارد استفاده را به خود تخصیص داده‌اند می‌پردازد. روش‌های زیادی برای استفاده از کامپیوترها به‌منظور بهینه‌کردن طراحی‌های مهندسی وجود دارد. تمام این روش‌ها اکتشافی هستند، به این معنی که رسیدن به مقدار بهینه واقعی را تضمین نمی‌کنند ولی روش‌های مناسبی را ارایه می‌دهند که با احتمال بالایی موفق به دستیابی به مقدار بهینه و یا مقادیر بسیار نزدیک به آن می‌شود.

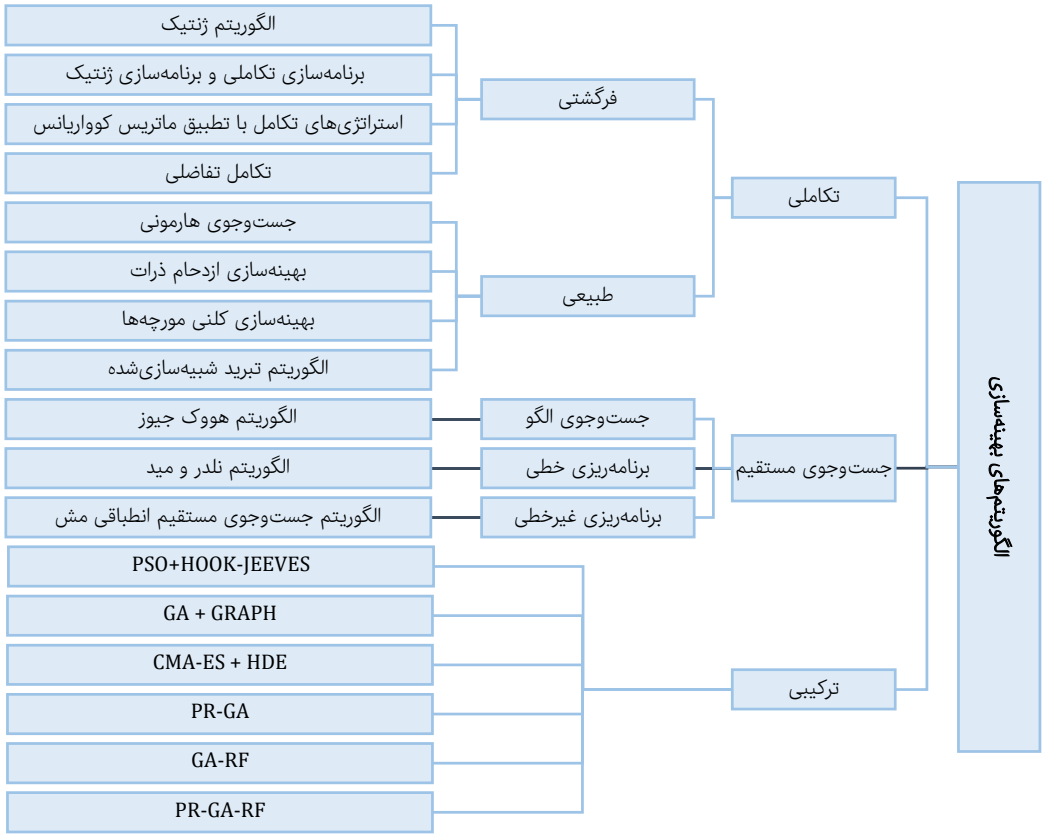
توضیح جزییات عملکرد هر کدام از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، از محدوده این پژوهش خارج است. به‌صورت کلی باید دانست که یافتن نقطه بهینه با استفاده از مشتق اول یا دوم تابع هدف امکان‌پذیر است، اما در کنار روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر مشتق، روش‌های بهینه‌سازی دیگری نیز وجود دارند که به حل مسایل مختلف در این حوزه کمک می‌کنند. این روش‌ها در بسیاری از دسته‌بندی‌ها تحت عنوان روش‌های بهینه‌سازی هوشمند، روش‌های بهینه‌سازی و محاسبات تکاملی و یا جست‌وجوی هوشمند شناخته می‌شوند. این روش‌ها این مزیت را دارند که بدون نیاز به مشتق تابع هزینه به یافتن نقطه بهینه آن می‌پردازند. این پژوهش نیز بر مسایلی بهینه‌سازی تمرکز می‌کند که تابع هدف یا قسمتی از آن با استفاده از برنامه‌های شبیه‌سازی عملکرد کل ساختمان و عموماً به‌صورت سالانه ارزیابی می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌های شبیه‌سازی‌شده ساختمان، می‌توانند غیرخطی باشند و به الگوریتم‌های بهینه‌سازی موثری احتیاج داشته باشند که بی‌نیاز از محاسبه و یا تقریب مشتقات باشند. از جمله چنین الگوریتم‌های مستقل از مشتقی، می‌توان به جست‌وجوی مستقیم و نیز جست‌وجوی تکاملی احتمالی اشاره کرد که در ادامه به آنها پرداخته خواهد شد.

شکل ۲ طبقه‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در طراحی را ارایه می‌دهد.



شکل ۲) طبقه‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در طراحی معماری

الگوریتم‌های تکاملی

الگوریتم‌های تکاملی زیرمجموعه‌ای از محاسبات تکاملی هستند و در شاخه هوش مصنوعی قرار می‌گیرند. این دسته از الگوریتم‌های بهینه‌سازی شامل الگوریتم‌های جست‌وجوگری هستند که در آنها عمل جست‌وجو از چندین نقطه در فضای جواب (مجموعه کل جواب‌های ممکن برای مساله) آغاز می‌شود. الگوریتم‌های تکاملی از مکانیزم‌ها و عملیات ابتدایی برای حل مساله استفاده می‌کنند و طی یک‌سری از تکرارها به راه‌حل مناسب برای مساله می‌رسند. این الگوریتم‌ها غالباً از یک جمعیت حاوی راه‌حل‌های تصادفی شروع می‌کنند و طی هر مرحله تکرار سعی در بهترکردن مجموعه راه‌حل‌ها دارند.

در آغاز کار تعدادی از اعضای جامعه به‌صورت تصادفی حدس زده می‌شوند. سپس تابع هدف برای هر یک از این اعضا محاسبه و نخستین نسل ایجاد خواهد شد. اگر هیچ‌یک از معیارهای خاتمه بهینه‌سازی دیده نشوند، ایجاد نسل جدید آغاز خواهد شد. اعضا بر حسب میزان شایستگی برای تولید نوزادها انتخاب می‌شوند. این افراد به‌عنوان والدین محسوب می‌شوند و بازترکیب نوزادها را تولید می‌کنند. سپس تمامی نوزادها با یک مقدار معینی از احتمال، یعنی همان جهش، تغییر ژنتیکی می‌یابند. اکنون میزان شایستگی (برازندگی) نوزادان تعیین می‌شود و در اجتماع جایگزین والدین می‌شوند و نسل جدید را ایجاد می‌نمایند. این چرخه آنقدر تکرار می‌شود تا یکی از معیارهای پایان بهینه‌سازی کسب شود[25]. برای آشنایی با تفاوت‌های الگوریتم‌های تکاملی با دیگر روش‌های بهینه‌سازی و جست‌وجوی مرسوم قدیمی مطالعات مختلفی وجود دارند[26].

الگوریتم‌های مبتنی بر فرگشت

این الگوریتم‌ها با استفاده از قانون بقای اصلح *داروین*، ضعیف‌ترین افراد آن جمعیت را حذف می‌کنند و باقی جمعیت را نگه می‌دارند. در عین حال از ابزارهایی برای جهش (اعمال تغییرات تصادفی) و تقاطع (ترکیب عناصر موجود در پاسخ‌های متفاوت) استفاده می‌کنند. انواع این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم ژنتیک، برنامه‌سازی تکاملی و برنامه‌سازی ژنتیک، استراتژی‌های تکامل با تطبیق ماتریس کوواریانس تکامل تفاضلی می‌شود[27]. با توجه به اینکه در میان الگوریتم‌های فرگشتی، الگوریتم ژنتیک از بقیه محبوب‌تر است[28]، در این پژوهش به آن بیشتر پرداخته می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک از اصول انتخاب طبیعی استفاده می‌کند تا مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را که به راه‌حل بهینه نزدیک هستند، استخراج کند. این الگوریتم، مبتنی بر جمعیت است و به‌طور موثری می‌تواند در مسایلی غیرخطی که ناپیوستگی و یا تعداد زیادی کمینه محلی دارند به کار برده شود و به همین دلیل به‌طور گسترده‌ای در حوزه بهینه‌سازی ساختمان به کار می‌رود. اصول کار آن بسیار شبیه به اصول کار الگوریتم‌های تعاملی است که پیش از این توضیح داده شد.

در ادامه به ارایه نمونه‌هایی از کاربرد الگوریتم ژنتیک در مسایل بهینه‌سازی طراحی پرداخته می‌شود.

رایت و *فرمانی*[29] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی توامان روش ساخت محصول، اندازه سامانه تهویه HVAC و راهبردهای کنترل نظارتی استفاده کرده‌اند. مساله بهینه‌سازی در این پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است و نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک قادر است راه‌حل‌های عملی را بیابد و به‌صورت مشروح نزدیک‌شدن به پاسخ بهینه را نمایش دهد. *کلی* و *شوکت*[30] از این الگوریتم برای کاهش مصرف انرژی سالیانه و ترکیب بهینه‌سازی کامپیوتری با داوری انسانی استفاده کرده‌اند. آنها بر این عقیده هستند که صرف کاهش اتلاف حرارتی، دستیابی به یک طراحی با مصرف انرژی کم را تضمین نخواهد کرد. بنابراین با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تعداد زیادی از آلترناتیوهای طراحی را با هدف کاهش مصرف انرژی آزمون می‌کنند و نتیجه آن را برای قضاوت در اختیار کاربران فضا قرار می‌دهند. *زنودا* و همکاران[31] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی طراحی ساختمان‌های مدیترانه‌ای پرداخته‌اند. در این منطقه انجام این کار بسیار پیچیده است، زیرا بار تهویه درست به میزان بار لازم برای تامین بار حرارتی است و انرژی مورد نیاز بستگی به تعداد زیادی از پارامترهای معماری دارد که تاثیرهای متفاوت و گهگاه متناقضی بر روی بار حرارتی زمستانی دارد. در این پژوهش، الگوریتم بهینه‌سازی، ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و ابزار ساده‌ای برای ارزیابی حرارتی ساختمان است. نتایج این پژوهش نیز استفاده از الگوریتم ژنتیک با هدف بهینه‌سازی اقتصادی را پیشنهاد می‌دهد. *پانایو* و همکاران[32] به الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تاثیر بالقوه ساختمان‌های شهری بر مصرف انرژی در عرض‌های جغرافیایی میانی می‌پردازند. *راخا* و *ناصر*[33] از این الگوریتم برای بهینه‌سازی فرم سقف براساس شدت نور روز استفاده کرده‌اند. در این پژوهش، هندسه سقف به‌عنوان یک عنصر اصلی که می‌تواند نور طبیعی را کنترل کند مورد بررسی قرار گرفته است. دستاوردهای این پژوهش، فرآیند یک طراحی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای معماران ارایه می‌دهد که هدف آن ایجاد و یافتن فرم سقف شبکه‌ای و منحنی‌شکل با هدف به‌حداکثررساندن نسبت یکنواختی نور روز است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزارهای رادیانس و اکوتکت استفاده شده و الگوریتم ژنتیک در زبان برنامه‌نویسی جامع توسعه یافته است. نتایج حاکی از توانمندی این رویکرد، در عین سادگی برای فرم‌یابی است. *پرنودت* و همکاران[34] از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی چندهدفه نوسازی ساختمان استفاده کرده‌اند. این پژوهش براساس الگوریتم ژنتیک، چندین جنبه را در نوسازی بنا در نظر می‌گیرد و راهکارهایی را برای بهبود روش بهینه‌سازی پیشنهاد می‌دهد. *یی* و همکاران[35] در بهینه‌سازی فرم‌های هندسی پیچیده ساختمانی از آن استفاده کرده‌اند. این پژوهش با تعریف رابطه سلسله‌مراتبی بین نقاط هندسی‌فرم، روشی برای کنترل تغییرات فرم‌ها ابداع کرده است تا کاربر بدون محدودیت بتواند فرم‌های مختلف را آزمون کند. در مطالعه‌ای با ترکیب الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار شبیه‌سازی ترنسیس، ابزاری برای طراحی خانه خورشیدی با مصرف انرژی صفر ارایه شده است[36]. *توهاس دوبرو* و *کرارتی*[37] ابزاری مشابه برای طراحی فرم و پوسته ساختمان‌های مسکونی ساخته‌اند. به‌عنوان بخشی از بهینه‌سازی پوسته، فرم‌های مختلف ساختمانی از جمله مستطیل، L، T، صلیب، U، H و ذوزنقه مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، متغیرهای مختلف پوسته از جمله ساخت دیوارها و سقف‌ها، انواع فونداسیون‌ها، سطوح عایق و انواع پنجره و مساحت‌ها در تجزیه و تحلیل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. ابزار پیشنهادی ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و یک ابزار شبیه‌سازی است. *تورین* و همکاران[38] نیز ابزار پاراجن را معرفی کرده‌اند که الگوریتم ژنتیک را با مدل‌سازی پارامتریک ترکیب می‌کند تا در میان آلترناتیوهای طراحی به کاوش بپردازد.

ویرایش‌های متعددی از الگوریتم ژنتیک برای حل مسایل مختلف نوشته شده‌اند. *مگنیر* و *حقیقت*[39] از یکی از محبوب‌ترین الگوریتم‌های چندهدفه با نام الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب که توسط *دب*[40] طراحی شده است، برای بهینه‌سازی طراحی ساختمان استفاده کرده‌اند. *چانتراله* و همکاران[41] نیز ابزاری بر پایه الگوریتم ژنتیک ساخته و از آن برای بهینه‌سازی چندهدفه بازسازی ساختمان استفاده کرده‌اند. *اوینز* و همکاران[42] نیز همین ابزار را برای مسایل بهینه‌سازی طراحی پیشنهاد داده‌اند. *پالونن* و همکاران[43] از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب و امنی- اپتیمایزر برای مسایل بهینه‌سازی شبیه‌سازی‌محور استفاده کرده‌اند و یک نسخه ترکیبی از این الگوریتم‌ها با الگوریتم هووک جیوز را نیز به کار برده‌اند که در بخش الگوریتم‌های ترکیبی به آن پرداخته خواهد شد. گونه‌هایی از استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل مسایل طراحی ساختمان نیز در مطالعات مختلف ارایه شده است[29, 44-46]. *کالداس* و *نسلی*[47] نیز از یک الگوریتم ژنتیک میکرو و الگوریتم ژنتیک پرتو براساس یک سیستم طراحی زاینده، استفاده کرده‌اند. *کاو* و همکاران[14] الگوریتم ژنتیک سریع محدوده محور را برای بهینه‌سازی استفاده از زمین به‌صورت پایدار معرفی کرده‌اند. *لی*[48] ابزار بهینه‌سازی را بر پایه شبیه‌سازی مکانیک سیالات و یک الگوریتم ژنتیک چندجزیره‌ای معرفی کرده است.

www.SID.ir

Archive of SID

برنامه‌ریزی تکاملی و برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی تکاملی و برنامه‌ریزی ژنتیک، هر دو از پارادایم‌های اصلی الگوریتم فرگشتی و به الگوریتم ژنتیک بسیار شبیه هستند. با این تفاوت که الگوریتم ژنتیک بر مکان پاسخ‌ها تاکید می‌کند اما این دو الگوریتم بر رابطه بین والد و نوزاد تمرکز می‌کنند. در برنامه‌سازی تکاملی تنها مقدار متغیرها می‌تواند تغییر کند. درواقع در این روش از تکثیر برای تولید نسل جدید استفاده نمی‌شود و اعضا تنها از طریق جهش تغییر پیدا می‌کنند[49]، اما در برنامه‌سازی ژنتیک ساختار نیز می‌تواند تغییر کند[50]. در مطالعات مختلفی از این الگوریتم‌ها استفاده شده است[54-51].

استراتژی‌های تکاملی با تطبیق ماتریس کوواریانس CMA-ES

روش تکاملی تطبیق ماتریس کوواریانس کلاس خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که نمونه‌های جدید خود را از یک توزیع احتمال نرمال انتخاب می‌کند. آموزش همبستگی بین پارامترها و استفاده از این همبستگی برای تسریع در سرعت همگرایی الگوریتم، مفهومی کلیدی در این الگوریتم است. در این روش مانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، ابتدا جمعیتی تعریف می‌شود و جست‌وجو توسط یک جمعیت در هر نسل ادامه پیدا می‌کند. الگوریتم جست‌وجو به این صورت است که در هر نسل مرکز وزن‌دار نقاط محاسبه می‌شود و سپس نقاط جدید نسل در کنار این مرکز به فاصله‌ای که ماتریس کوواریانس تعیین می‌کند تولید می‌شوند. ماتریس کوواریانس و مرکز وزن‌دار نقاط پیوسته در هر نسل به‌روز می‌شوند و با توجه به اطلاعات هر نسل، نسل بعدی تولید می‌شود. هر نسل دارای دو اطلاعات مهم هزینه و مکان است. هزینه هر یک از اعضا مشخص می‌کند که آیا مکان فعلی عضو برای تولید عضوی دیگر مناسب است یا نه و الگوریتم سعی می‌کند که اعضای جدید نسل را در نزدیکی اعضای قبلی که هزینه مناسبی داشتند تولید کند و این اطلاعات کمک می‌کند که الگوریتم بسیار سریع‌تر از الگوریتم‌های دیگر به جواب برسد[55]. ماتریس کوواریانس براساس مسیر تکامل و تفاوت بین بهترین نمونه جاری با قبلی تطبیق می‌یابد[56]. از این الگوریتم به‌صورت ترکیبی در پژوهش *کامف* و *روبینسون*[57] استفاده شده است.

الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکامل تفاضلی نخستین‌بار در سال ۱۹۹۵ توسط *استورن* و *پرایس*[58] معرفی شد. این پژوهشگران نشان دادند که این الگوریتم توانایی خوبی در بهینه‌سازی توابع غیرخطی مشتق‌ناپذیر دارد و می‌تواند به‌عنوان روشی قدرتمند و سریع برای مسایل بهینه‌سازی در فضاهای پیوسته مورد استفاده قرار گیرد. این الگوریتم برای غلبه بر عیب اصلی الگوریتم ژنتیک، یعنی فقدان جست‌وجوی محلی عرضه شده و تفاوت اصلی بین الگوریتم‌های ژنتیکی و این الگوریتم در عملگر انتخاب است. در الگوریتم ژنتیک، شانس انتخاب یک جواب به‌عنوان یکی از والدین، وابسته به مقدار شایستگی آن است، اما در الگوریتم تکامل تفاضلی همه جواب‌ها دارای شانس مساوی برای انتخاب‌شدن هستند، یعنی شانس انتخاب‌شدن آنها وابسته به مقدار شایستگی آنها نیست. پس از اینکه یک جواب جدید تولید شد، با مقدار قبلی مقایسه و در صورت بهتربودن جایگزین می‌شود. درواقع در این الگوریتم اول عملگر جهش و سپس عملگر تقاطع اعمال می‌شود تا بدین وسیله نسل جدید ایجاد شود (همان).

الگوریتم‌های مبتنی بر سایر پدیده‌های طبیعی

از میان الگوریتم‌های فراابتکاری که از سایر فرآیندهای طبیعی الهام گرفته‌اند می‌توان به جست‌وجوی هارمونی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه‌سازی کلنی مورچه‌ها و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده اشاره کرد.

PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات)

PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات) که با نام‌های مختلفی همچون الگوریتم انبوه ذرات، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم پرندگان نیز شناخته شده است، یک الگوریتم تکاملی الهام‌گرفته از طبیعت و براساس تکرار است. ایده این الگوریتم برای اولین‌بار توسط *کندی* و *ابرهارت*[59] در سال ۱۹۹۵ مطرح شده است. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته‌جمعی پرندگان و ماهی‌ها است. این الگوریتم از این جهت که با یک جمعیت تصادفی اولیه شروع می‌شود، شبیه بسیاری دیگر از الگوریتم‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک است اما برخلاف الگوریتم ژنتیک، هیچ عملگر تکاملی همانند جهش و تزویج ندارد. هر عضو از جمعیت، یک ذره نامیده می‌شود که معادل کروموزوم در الگوریتم ژنتیک است. درواقع این الگوریتم، از تعداد مشخصی از ذرات تشکیل می‌شود که به‌طور تصادفی، مقدار اولیه‌ای می‌گیرند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت تعریف می‌شود. این ذرات، به‌صورت تکرارشونده در فضای مساله حرکت می‌کنند تا با محاسبه شایستگی به‌عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جست‌وجو کنند. بعد فضای مساله، برابر تعداد پارامترهای موجود در تابع مورد نظر برای بهینه‌سازی است. یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت پیش‌آمده در میان همه ذرات، اختصاص می‌یابد. با تجربه حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای n- بعدی مساله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه بهینه عام، پیدا شود. سرعت‌ها و موقعیت ذرات را بر حسب بهترین جواب‌های مطلق و محلی به‌روز می‌کنند[60]. مزیت اصلی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات این است که پیاده‌سازی این الگوریتم ساده است و نیاز به تعیین پارامترهای کمی دارد. همچنین قادر به بهینه‌سازی توابع هزینه پیچیده با تعداد زیاد مینیمم محلی است[61]. نمونه‌هایی از به‌کارگیری این الگوریتم در پژوهش‌های *فرارا* و همکاران[62] و *راپو* و *سارو*[63] مشاهده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جست‌وجوی هارمونی

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی یکی از الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت است. این الگوریتم اولین‌بار توسط *جیم* و همکاران[64] در سال ۲۰۰۱ ارایه شد. الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برگرفته از فعالیت موسیقی موسیقی‌دانان است که به دنبال پیداکردن یک هارمونی کامل و بی‌نقص هستند[65]. در این الگوریتم، مقادیر متغیرها برای دستیابی به یک ترکیب بهتر دوباره با مقادیر دیگری در همسایگی خود ترکیب می‌شوند و جمعیت بهترین جواب‌ها حفظ می‌شود[64]. از جمله مزایای آن می‌توان به کاربردی‌بودن برای مسایل بهینه‌سازی گسسته و پیوسته، محاسبات ریاضیاتی کم، مفهوم ساده، پارامترهای کم و اجرای آسان، غیرحساس‌بودن به مقادیر اولیه و جایگزین‌کردن جست‌وجوی تصادفی به‌جای جست‌وجوی گرادیانی اشاره کرد[65]. این الگوریتم در کاربردهای بهینه‌سازی از قبیل دسته‌بندی داده‌ها در پژوهش *فسنقری* و همکاران[66] و بهینه‌سازی ترکیبی در پژوهش *فسنقری* و همکاران[66] و *اوساما* و همکاران[67] و غیره استفاده شده است.

ACO (الگوریتم کلنی مورچه‌ها)

الگوریتم کلنی مورچه‌ها، الهام‌گرفته از مطالعات و مشاهدات بر روی کلنی مورچه‌ها است. هدف این الگوریتم، یافتن کوتاه‌ترین مسیر میان منابع غذایی و آشیانه است. بنابراین از این الگوریتم برای بهینه‌یابی در مسایلی که نیاز به یافتن کوتاه‌ترین مسیر دارند استفاده می‌شود. این نوع رفتار مورچه‌ها نوعی هوشمندی توده‌ای (در این نوع از هوشمندی عناصر رفتاری تصادفی دارند و بین آنها هیچ نوع ارتباط مستقیمی وجود ندارد)، دارد که از دیرباز مورد توجه دانشمندان قرار داشته است[68]. مورچه‌ها هنگام راه‌رفتن از خود ردی از ماده شیمیایی به نام فرومون به‌جای می‌گذارند. البته این ماده به‌زودی تبخیر می‌شود ولی در کوتاه‌مدت به‌عنوان رد مورچه بر سطح زمین باقی می‌ماند. یک رفتار پایه‌ای ساده در مورچه‌ها وجود دارد، آنها هنگام انتخاب بین دو مسیر، مسیری را برمی‌گزینند که احتمال وجود فرومون بیشتری در آن باشد، یا به عبارت دیگر قبلاً مورچه‌های بیشتری از آن عبور کرده باشند[69]. با تقلیدکردن فرآیندی که در آن حشرات با جای‌گذاری موادی در مسیرها، بقیه مورچه‌ها را تشویق می‌کنند تا از آن مسیر عبور کنند، مقادیر متغیرهایی که بیشتر از بقیه استفاده شده‌اند مبنای تعیین مسیر برای انتخاب مقادیر بعدی خواهند بود. تبخیرشدن فرومون و احتمال تصادف به مورچه‌ها امکان پیداکردن کوتاه‌ترین مسیر را می‌دهد[70]. تاکنون گونه‌های مختلفی نظیر سیستم مورچه نخبگان، سیستم مورچه حداکثری حداقلی، سیستم کلنی مورچه، سیستم مورچه براساس رتبه و سیستم مورچه متعامد مداوم از این الگوریتم شناسایی شده‌اند.

الگوریتم تبرید

الگوریتم تبرید یا SA (شبیه‌سازی حرارتی) یکی از مجموعه الگوریتم‌های فرااکتشافی معروف در زمینه الگوریتم‌های هوش مصنوعی است. این الگوریتم در سال ۱۹۸۳ و توسط *کیرکپاتریک* و *وکی*[71] ابداع و بر مبنای فرآیند تبرید یا بازپخت فلزات بنا نهاده شده است. در فرآیند تبرید، ابتدا حرارت فلزات تا دمای بسیار بالایی افزایش داده می‌شود و سپس یک فرآیند سردسازی و کاهش دمای تدریجی بر روی آنها صورت می‌گیرد. در این فرآیند در هنگام افزایش حرارت فلز، سرعت جنبش اتم‌های آن به‌شدت افزایش می‌یابد و در مرحله بعد، کاهش تدریجی دما موجب شکل‌گیری الگوهای خاصی در جای‌گیری اتم‌های آن می‌شود. این تغییر الگوی اتم‌ها باعث بروز خواص ارزشمندی در فلز تبریدشده می‌شود که از جمله می‌توان به افزایش استحکام آن اشاره کرد[72]. در این الگوریتم، پاسخ‌ها از جایگاه کنونی خود پراکنده می‌شوند و احتمال باقی‌ماندن جواب‌های بهتر به‌تدریج و در طول زمان بیشتر می‌شود[73].

روش جست‌وجوی مستقیم

گونه‌ای از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مشتق‌ناپذیر، روش‌های جست‌وجوی مستقیم هستند. این الگوریتم‌ها از قوانین اکتشافی و ابتکاری برای جست‌وجو در میان راه‌حل‌ها استفاده می‌کنند و نیاز دارند که تابع عملکرد، بدون تخمین مشتقات، به‌صورت پیوسته باشد. درواقع روش جست‌وجوی مستقیم، روش‌هایی را شامل می‌شود که مجموعه‌ای از جواب‌های آزمایشی را با هم مقایسه می‌کند تا بهترین جواب به دست آید[74]. عموماً این روش‌ها کارآمد هستند ولی ممکن است در نقاط بهینه نسبی گیر کنند. این الگوریتم‌ها به اندازه روش‌های مشتق‌پذیر موثر نیستند، اما *تورکزون* نشان داده است که معمولاً برای توابع پرآشوب که در آنها مشتقات تحلیلی در دسترس نیستند و یا جایی که تقریب‌های تفاضل محدود به شیب غیرقابل اعتماد هستند، قوی‌تر عمل می‌کنند[75].

روش جست‌وجوی الگو

روش جست‌وجوی الگو روشی مبتنی بر بهینه‌سازی عددی است که برای توابعی که ناپیوسته یا تشخیص‌پذیر هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم هر بعد در هر نوبت آزمایش می‌شود. زمانی که پیشرفت بیشتری به دست نیامد، اندازه گام نصف می‌شود[76]. در برخی مطالعات از این روش استفاده و به اکتشاف رابطه بین آلترناتیوهای طراحی با مصرف انرژی پرداخته شده است[77, 78]. در نهایت ابزار بهینه‌سازی پژوهشگران، توانسته است اقتصادی‌ترین طرح را از میان همه طرح‌ها بیابد.

روش برنامه‌ریزی خطی

برنامه‌ریزی خطی، یا همان بهینه‌سازی خطی، روشی در ریاضیات است که به پیداکردن مقدار کمینه یا بیشینه از یک تابع می‌پردازد. به‌عبارت دیگر برنامه‌ریزی خطی عبارت است از یک تکنیک ریاضی برای تخصیص منابع محدود موجود به بهترین صورت ممکن در حالی که روابط فی‌مابین عوامل متغیرها خطی باشد[79] که می‌توان روش ساده و روش نلدر و مید را برای نمونه نام برد. اگر تابع هدف و قیدها خطی باشند، نقطه بهینه در بیشترین مقدار اتفاق می‌افتد[80]. الگوریتم ساده نلدر و مید در میان محققین

www.SID.ir

Archive of SID

بسیار محبوب است اما *لوئیس* و همکاران[77] نشان می‌دهند در مورد توانایی‌های آن تردیدهایی وجود دارد. این روش می‌تواند بسیار موثر عمل کند و گاهی یک راه‌حل را به نسبت سایر الگوریتم‌ها در تعداد ارزیابی‌های کمتری از تابع هدف بیابد، اما ممکن است به موفقیت هم نائل نیاید. نمونه‌ای از این مساله را می‌توان در مطالعه *وتر* و *رایت* دید[3]. یک روش نه‌چندان معمول هم در مطالعه *گونگ* و همکاران[81] دیده می‌شود که در آن *گونگ*، رویکردی جدید را در بهینه‌سازی طراحی ساختمان پیشنهاد می‌دهد که از آن در ارزیابی اهمیت پارامترها و تاثیر متقابل آنها استفاده می‌کند. *ساپوریتو* و همکاران[82] نیز از روش شبکه‌بندی برای بهینه‌سازی سرتاسری استفاده کرده‌اند تا تعداد تست‌های شبیه‌سازی را کاهش دهند و اهمیت ویژگی‌های مختلف صرفه‌جویی در انرژی را بیان کنند. *بوچلاگم* از روش ساده نلدر و مید و روش پیچیده غیرتصادفی *مایکل* و *کاپلان* برای بهینه‌سازی رفتار حرارتی ساختمان استفاده کرده است[80, 83-85].

روش برنامه‌ریزی غیرخطی

در یک مساله بهینه‌سازی اگر حداقل یک قید یا تابع هدف خطی نباشد، آنگاه مساله را یک مساله برنامه‌ریزی غیرخطی می‌نامند. *ایزنهوور* و همکاران[86] در مطالعه خود از یک روش مشتق- آزاد برای بهینه‌سازی انرژی مدل‌های ساختمانی استفاده کرده‌اند که شامل الگوریتم جست‌وجوی مستقیم انطباقی مش است. در این پژوهش روشی برای بهینه‌سازی کل ساختمان از نظر انرژی ارایه شده است. اهمیت این موضوع در این است که زمانی که بحث بهینه‌سازی در مورد کل ساختمان مطرح می‌شود متغیرهای زیادی برای بررسی وجود دارند که سبب ناپیوستگی تابع هدف می‌شوند و تعداد پاسخ‌های محلی را بالا می‌برند. برای حل این مساله، این پژوهشگران از آنالیز حساسیت بهره برده‌اند. الگوریتم مورد استفاده، یک الگوریتم جست‌وجوی مستقیم با ویژگی‌های همگرایی دقیق است که پس از شناسایی و اصلاح ناپیوستگی‌های مدل شبیه‌سازی‌شده، بر روی یک متامدل جانشین کار می‌کند. به این روش ناپیوستگی در فضای جواب از بین می‌رود.

الگوریتم‌های ترکیبی

یک رویکرد محبوب در میان پژوهشگران، استفاده از بیش از یک الگوریتم در یک عملیات ترکیبی بهینه‌سازی است. فرآیند معمول در این رویکرد، این است که از یک الگوریتم جست‌وجوی سرتاسری برای یافتن راه‌حل نزدیک به بهینه استفاده می‌کنند و سپس این راه‌حل را به‌عنوان یک نقطه شروع، در بهینه‌ساز محلی به کار می‌برند.

نرم‌افزار GenOpt مثال مناسبی از این رویکرد است که در آن بهینه‌سازی ازدحام ذرات، شروع به جست‌وجوی سرتاسری برای نقطه بهینه می‌کند. زمانی که کار این الگوریتم به پایان رسید، الگوریتم هووک‌جیوز جست‌وجو را برای پالایش نتایج ادامه می‌دهد. *حسن* و همکاران[9] از این ترکیب الگوریتم برای کمینه‌سازی هزینه چرخه عمر خانه‌های جدا از هم استفاده کرده‌اند. *جوآن* و همکاران[87] در مطالعه خود در رویکردی ترکیبی، الگوریتم جست‌وجوی گراف را با الگوریتم ژنتیک ترکیب کرده‌اند تا کلیه حالات ممکن عملیات بازسازی و مسایل تجاری مربوط به آنها برای یافتن راه‌حلی بهینه تحلیل شوند. *کامف* و *روبینسون*[57] ترکیبی از استراتژی تکامل سازگاری ماتریس کوواریانس را با تکامل دیفرانسیل دوگانه HDE برای بهینه‌ساختن مصرف انرژی خورشیدی براساس فرم پیشنهاد داده‌اند. یک الگوریتم ترکیبی جالب توسط *حمدی* و همکاران[88] پیشنهاد شده است. این طرح پیشنهادی، اجرای یک الگوریتم قطعی، پیش و یا پس از الگوریتم ژنتیک چندهدفه است. این کار می‌تواند در حالت پیشینی، یک جمعیت اولیه برای استفاده در الگوریتم ژنتیک بیابد و یا نتایج الگوریتم ژنتیک را در حالت پسینی پالایش کند. ترکیب پیشینی به‌منظور کاهش رفتار تصادفی الگوریتم ژنتیک و درنتیجه آن یافتن راه‌حل‌های مناسب با تعداد ارزیابی کمتر به کار می‌رود. ترکیب پسینی برای جایی پیشنهاد می‌شود که نتایج باکیفیتی مورد نیاز است و معیار خوبی برای پایان‌دادن به پروسه تعریف می‌کند[88]. آنها این دو روش را با هم ترکیب کرده‌اند تا به ترکیب پیشینی- پسینی برسند و از مزیت‌های هر دو استفاده کنند.

بحث

بیشتر مباحث مطرح‌شده در این پژوهش به وسیله مرجع علمی ساینس‌دایرکت بسط داده شده‌اند. جست‌وجو در عناوین و چکیده مقالات به وسیله لغات کلیدی ساختمان و بهینه‌سازی، ۴۵۷۴ مقاله را تا انتهای سال ۲۰۱۹ نتیجه داد. این رقم پس از یک گزینش ثانویه در عنوان مقالات، به ۱۵۴۷ مقاله کاهش پیدا کرد. یک بازبینی در چکیده‌ها نشان داد که بیش از نیمی از این مقالات بر روی بهینه‌سازی کنترل ساختمان و یا تحلیل طراحی سازه متمرکز شده‌اند که حذف شدند. خروجی نهایی کارهای بررسی‌شده به کمک مقالات مکملی که در منابع ذکر شده‌اند، کامل شد.

از این رو، با توجه به تعداد مقالات بهینه‌سازی طراحی ساختمان، به نظر می‌رسد که اینگونه تکنیک‌های بهینه‌سازی هنوز در مراحل اولیه خود به سر می‌برند. حدود ۵۰% این مقالات برای تمام لغات کلیدی، در ۵ سال اخیر تالیف شده‌اند که خود می‌تواند بستری برای اتخاذ این تکنیک‌ها در فرآیند طراحی ساختمان در آینده‌ای نزدیک باشد. به علاوه در این دوره پنج‌ساله، پژوهش‌ها در رشته‌های مرتبط با معماری (مکانیک ساختمان و نگهداری و کنترل) رشد بیشتری به نسبت رشد در این رشته داشته‌اند، در صورتی که امکان بهینه‌سازی در مراحل اولیه طراحی در معماری بسیار بیشتر از این رشته‌ها است. این امر لزوم توجه و آموزش بحث بهینه‌سازی را در طراحی معماری دوچندان می‌کند. در ادامه با ارایه نمونه‌هایی به موفقیت‌هایی که پژوهشگران با استفاده از این رویکرد به دست آورده‌اند پرداخته می‌شود.

حسن و همکاران[9] توانسته‌اند ۲۳ تا ۴۹% میزان انرژی لازم برای گرمایش موثر یک خانه در فنلاند را در مقایسه با مرجع مطالعاتی

www.SID.ir

Archive of SID

خود کاهش دهند[9]. در مطالعه دیگری نیز مصرف انرژی سالانه تا۵۰% در مقایسه با شیوه‌های طراحی معمول در تونس کاهش یافته است[89]. تنظیمات بهینه در نمونه‌های آزمایشی *کامف* و همکاران[90]، منجر به کاهش ۳۰درصدی مصرف انرژی نسبت به نمونه اولیه شده است. *آیزنهاور* و همکاران[86] با اعمال شیوه بهینه‌سازی خود در یک ساختمان موفق به کاهش سالیانه ۴۵% انرژی و افزایش ۲ واحدی ضریب آسایش حرارتی شده‌اند. *اندرسون* و همکاران[91] با استفاده از نرم‌افزار BEopt، مصرف انرژی منبع را در یک خانه به میزان ۶۰% کاهش داده‌اند.

در تمامی موارد گفته‌شده، الگوریتم‌های بهینه‌سازی با یک موتور شبیه‌ساز کامل ساختمانی جفت شده‌اند که طبیعتاً بحث در مورد آنها در این پژوهش نمی‌گنجد. با وجود اینگونه پیشرفت‌های قابل توجه در بحث بهینه‌سازی انرژی، واضح است که هزینه مطالعات بهینه‌سازی می‌تواند به‌راحتی با صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی و سرمایه‌گذاری مستهلک شود. این مساله به‌سادگی در پروژه‌های ساختمانی عظیم قابل دستیابی است. با آشنایی بیشتر مهندسین با اینگونه روش‌ها و بهبود کاربری ابزارهای بهینه‌ساز، این تکنیک‌ها برای پروژه‌های کوچک‌تر نیز توجیه‌پذیر خواهند بود.

یوآن و همکاران[92] در مقایسه بین سه الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و بهینه‌سازی کلنی مورچگان و همچنین الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نشان داده‌اند که الگوریتم کلنی مورچگان و ازدحام ذرات دارای دقت و سرعت همگرایی بالاتری نسبت به ژنتیک و تبرید هستند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش بازبینی اجمالی از جدیدترین تحقیقات پژوهشی در باب استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی طراحی ساختمان است.

اولین نتیجه‌گیری از این بررسی این است که تعداد مقالات پژوهشی که از این الگوریتم‌ها برای بهینه‌کردن طراحی ساختمان استفاده کرده‌اند، هنوز در مقابل تعداد مقاله‌های بهینه‌سازی کنترل ساختمان، خیلی کم است. یک توجیه منطقی می‌تواند این باشد که مطالعه شبیه‌سازی کامل ساختمان تنها در یک دهه اخیر رواج یافته است. ابزارهای بهینه‌سازی تلفیق‌شده با یک برنامه شبیه‌سازی کامل ساختمان موجود و آماده استفاده هستند.

همچنین الگوریتم‌های تکاملی و روش‌های جست‌وجوی مستقیم به‌خوبی با برنامه‌های عملکرد ساختمان جفت شده‌اند. روش‌های جست‌وجوی مستقیم در صورت عدم وجود گسستگی‌های وسیع در تابع هدف می‌توانند بسیار موثر باشند، در غیر این صورت ممکن است عمل نکنند و یا در کمینه نسبی گرفتار شوند. یک رویکرد مناسب برای حل این مساله استفاده از یک الگوریتم تکاملی برای جست‌وجوی کلان و یک جست‌وجوی مستقیم به‌منظور تدقیق راه‌حل‌ها است.

روش‌های بهینه‌سازی اکثراً در فاز مقدماتی طراحی یک بنای جدید و یا در بازسازی ساختمان کاربرد دارند و استفاده از نظرات متخصصان و تشخیص‌های تخصصی می‌تواند یک مساله بهینه‌سازی را ساده‌سازی کند و وسعت فضای جست‌وجوی راه‌حل را کاهش دهد.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی نشان داده‌اند که می‌توانند در یافتن تنها راه‌حل مجاز یک مساله بسیار موثر باشند. هر چند که ارایه تنوعی از راه‌حل‌ها در حد عملکرد استاندارد می‌تواند برای فرآیند تصمیم‌گیری سودمند باشد. در هنگام بررسی نتایج، جایگزین‌های طراحی جالب توجهی را می‌توان با عملکردی مشابه یافت.

در مسایلی که شبیه‌سازی کامل ساختمان نیاز است، الگوریتم‌های موجود اکثراً نمی‌توانند اطمینان دهند که راه‌حل حقیقی مطلوبی را پیدا کنند.

تاثیرات زیست‌محیطی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه بهره‌برداری و معیارهای آسودگی معمولاً اهداف مطالعات بهینه‌سازی هستند. مصالح ساختمانی، فرم و جهت ساختمان، طراحی و ساختار سایه‌اندازی سیستم تهویه متبوع، متغیرهای کلی طراحی هستند.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
سهم نویسندگان: پیمان پیله‌چی‌ها، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۱۰۰%)
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1- Garber R. Optimisation stories: The impact of building information modelling on contemporary design practice. Archit Des. 2009;79(2):6-13.
2- Banos R, Manzano-Agugliaro F, Montoya FG, Gil C, Alcayde A, Gómez J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2011;15(4):1753-66.
3- Wetter M, Wright J. A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. Build Environ. 2004;39(8):989-99.
4- Wang L, Yan Z, Qiao Sh, Lu GM, Huang Y. Structural and morphological transformations of mesostructured titanium phosphate through hydrothermal treatment. J Colloid Interface Sci. 2007;316(2):954-61.
5- Bambrook SM, Sproul AB, Jacob D. Design optimisation for a low energy home in Sydney. Energy Build. 2011;43(7):1702-11.
6- Goia F, Haase M, Perino M. Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting simulations in a total energy perspective. Appl Energy. 2013;108:515-27.
7- Prianto E, Depecker P. Optimization of architectural design elements in tropical humid region with thermal comfort approach. Energy Build. 2003;35(3):273-80.
8- Heiselberg P, Brohus H, Hesselholt A, Rasmussen H, Seinre E, Thomas S. Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings. Renew Energy. 2009;34(9):2030-6.

www.SID.ir

Archive of SID

9- Hasan A, Vuolle M, Sirén K. Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. Build Environ. 2008;43(12):2022-34.
10- Roy R, Hinduja S, Teti R. Recent advances in engineering design optimisation: Challenges and future trends. CIRP Ann. 2008;57(2):697-715.
11- Attia Sh, Hamdy M, O'Brien L, Carlucci S. Computational optimisation for zero energy buildings design: Interviews results with twenty-eight international experts. Building Simulation 2013- 13th International IBPSA Conference, 2013 26-28 August, Chambéry, France. Chambery: IBPSA; 2013.
12- kelidestan.com [Internet]. Tehran: kelidestan.com; 2016 [2016 January 14]. Available from: http://www.kelidestan.com/keys/keys.php?key=641. [Persian]
13- Pilechiha P, Mahdavinejad M, Rahimian FP, Carnemolla P, Seyedzadeh S. Multi-objective optimisation framework for designing office windows: Quality of view, daylight and energy efficiency. Appl Energy. 2020;261:114356.
14- Cao K, Huang B, Wang Sh, Lin H. Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm. Comp Environ Urban Syst. 2012;36(3):257-69.
15- Adamski M. Optimization of the form of a building on an oval base. Build Environ. 2007;42(4):1632-43.
16- Marks W. Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. Build Environ. 1997;32(4):331-9.
17- D'Cruz NA, Radford AD. A multicriteria model for building performance and design. Build Environ. 1987;22(3):167-79.
18- Jedrzejuk H, Marks W. Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilisation. Partial problems solution. Build Environ. 2002;37(11):1037-43.
19- Osyczka A. Computer aided multicriterion optimization system (CAMOS). In: Eschenauer HA, Thierauf G, editors. Discretization methods and structural optimization-procedures and applications 1989. Berlin: Springer; 1989. pp. 263-70.
20- Castro-Lacouture D, Sefair JA, Flórez L, Medaglia AL. Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia. Build Environ. 2009;44(6):1162-70.
21- Michalek J, Choudhary R, Papalambros P. Architectural layout design optimization. Eng Optim. 2002;34(5):461-84.
22- Chakrabarty BK. Computer-aided design in urban development and management-A software for integrated planning and design by optimization. Build Environ. 2007;42(1):473-94.
23- Petersen S, Svendsen S. Method for component-based economical optimisation for use in design of new low-energy buildings. Renew Energy. 2012;38(1):173-80.
24- Stavrakakis GM, Zervas PL, Sarimveis H, Markatos NC. Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings. Appl Math Model. 2012;36(1):193-211.
25- Back T. Evolutionary algorithms in theory and practice: Evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms. Oxford: Oxford University Press; 1996.
26- Ashlock D. Evolutionary computation for modeling and optimization. Berlin: Springer Science & Business Media; 2006.
27- Darwin Ch. Evolution by natural selection: The London years, 1836-42 [Internet]. Chicago: Britannica; 2020 [cited 2016 August 16]. Available from: https://www.britannica.com/science/Copley-Medal
28- Holland JH. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Ann Arbor: University of Michigan Press; 1975.
29- Wright J, Farmani R. The simultaneous optimization of building fabric construction, HVAC system size, and the plant control strategy. 7th International IBPSA Conference, 2001 August 13-15, Rio de Janeiro, Brazil. Berlin: Building Simulation; 2001.
30- Coley DA, Schukat S. Low-energy design: Combining computer-based optimisation and human judgement. Build Environ. 2002;37(12):1241-7.
31- Znouda E, Ghrab-Morcos N, Hadj-Alouane A. Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms. Energy Build. 2007;39(2):148-53.
32- Panão MJ, Gonçalves HJ, Ferrão PM. Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach. Renew Energy. 2008;33(5):887-96.
33- Rakha T, Nassar K. Genetic algorithms for ceiling form optimization in response to daylight levels. Renew Energy. 2011;36(9):2348-56.
34- Pernodet F, Lahmidi H, Michel P. Use of genetic algorithms for multicriteria optimization of building refurbishment. 11th International IBPSA Conference, 2009 July 27-30, Glasgow, Scotland. Berlin: Building Simulation; 2009.
35- Yi YK, Malkawi AM. Optimizing building form for energy performance based on hierarchical geometry relation. Autom Constr. 2009;18(6):825-33.
36- Charron R, Athienitis A. The use of genetic algorithms for a net-zero energy solar home design optimisation tool. Proceedings of PLEA 2006 (23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture), 2006 September 6-8, Geneva, Switzerland. Geneva: PLEA; 2006.
37- Tuhus-Dubrow D, Krarti M. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. Build Environ. 2010;45(7):1574-81.
38- Turrin M, Von Buelow P, Stouffs R. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. Adv Eng Inform. 2011;25(4):656-75.
39- Magnier L, Haghighat F. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. Build Environ. 2010;45(3):739-46.
40- Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Hoboken: John Wiley & Sons; 2001.
41- Chantrelle FP, Lahmidi H, Keilholz W, El Mankibi M, Michel P. Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. Appl Energy. 2011;88(4):1386-94.
42- Evins R, Pointer P, Vaidyanathan R, Burgess S. A case study exploring regulated energy use in domestic buildings using design-of-experiments and multi-objective optimisation. Build Environ. 2012;54:126-36.

www.SID.ir

Archive of SID

operational energy costs of a multi-family building. Energy Procedia. 2016;101:216-23.
63- Rapone G, Saro O. Optimisation of curtain wall façades for office buildings by means of PSO algorithm. Energy Build. 2012;45:189-96.
64- Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV. A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. Simulation. 2001;76(2):60-8.
65- Yang X. Harmony search as a metaheuristic algorithm. In: Geem Z, editor. Music-inspired harmony search algorithm: Theory and applications. Berlin: Springer; 2009. pp. 1-14.
66- Fesanghary M, Mahdavi M, Minary-Jolandan M, Alizadeh Y. Hybridizing harmony search algorithm with sequential quadratic programming for engineering optimization problems. Comput Methods Appl Mech Eng. 2008;197(33-40):3080-91.
67- Moh'd Alia O, Mandava R, Aziz ME. A hybrid harmony search algorithm for MRI brain segmentation. Evolut Intell. 2011;4(1):31-49.
68- Dorigo M, Blum C. Ant colony optimization theory: A survey. Theor Comput Sci. 2005;344(2-3):243-78.
69- Angus D, Hendtlass T. Dynamic ant colony optimisation. Appl Intell. 2005;23(1):33-8.
70- Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Trans Syst Man Cybern Part B Cybern. 1996;26(1):29-41.
71- Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing. Science. 1983;220(4598):671-80.
72- Černý V. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. J Optim Theory Appl. 1985;45(1):41-51.
73- Hwang CR. Simulated annealing: Theory and applications. Acta Applicandae Mathematicae. 1988;12(1):108-11.
74- Kolda TG, Lewis RM, Torczon V. Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods. SIAM Rev. 2003;45(3):385-482.
75- Torczon V. PDS: Direct search methods for unconstrained optimization on either sequential or parallel machines. Houston: Rice University; 1992.
76- Hooke R, Jeeves TA. "Direct Search" solution of numerical and statistical problems. J ACM. 1961;8(2):212-29.
77- Lewis RM, Torczon V, Trosset MW. Direct search methods: Then and now. J Comput Appl Math. 2000;124(1-2):191-207.
78- Peippo K, Lund PD, Vartiainen E. Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings. Energy Build. 1999;29(2):189-205.
79- Noyes J, Weisstein EW. Linear Programming [Internet]. New York: Wolfram MathWorld; 2016 [cited 2016 August 17]. Available from: http://mathworld.wolfram.com/LinearProgramming.html
80- Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. Comput J. 1965;7(4):308-13.
81- Gong X, Akashi Y, Sumiyoshi D. Optimization of passive design measures for residential buildings in different Chinese areas. Build Environ. 2012;58:46-57.
82- Saporito A, Day AR, Karayiannis TG, Parand F. Multi-parameter building thermal analysis using the lattice method for global optimisation. Energy Build. 2001;33(3):267-74.
83- Mitchell RA, Kaplan JL. Nonlinear constrained optimization by a nonrandom complex method. J Res Natl Bur Stand Sect C Eng Instrum. 1968;72C(4):249-58.
43- Palonen M, Hasan A, Siren K. A genetic algorithm for optimization of building envelope and HVAC system parameters. 11th International IBPSA Conference, 2009 July 27-30, Glasgow, Scotland. Berlin: Building Simulation; 2009. pp. 159-66.
44- Sambou V, Lartigue B, Monchoux F, Adj M. Thermal optimization of multilayered walls using genetic algorithms. Energy Build. 2009;41(10):1031-6.
45- Wang W, Zmeureanu R, Rivard H. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. Build Environ. 2005;40(11):1512-25.
46- Shi X. Design optimization of insulation usage and space conditioning load using energy simulation and genetic algorithm. Energy. 2011;36(3):1659-67.
47- Caldas LG, Norford LK. A design optimization tool based on a genetic algorithm. Autom Constr. 2002;11(2):173-84.
48- Lee JH. Optimization of indoor climate conditioning with passive and active methods using GA and CFD. Build Environ. 2007;42(9):3333-40.
49- Fogel LJ. Intelligence through simulated evolution: Forty years of evolutionary programming. Hoboken: Wiley; 1999.
50- Sette S, Boullart L. Genetic programming: principles and applications. Eng Appl Artif Intell. 2001;14(6):727-36.
51- Fong KF, Hanby VI, Chow TT. HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming. Energy Build. 2006;38(3):220-31.
52- Alvarez L. Design optimization based on genetic programming. Bradford: University of Bradford; 2000.
53- Kim K, Shan Y, Nguyen XH, McKay RI. Probabilistic model building in genetic programming: A critical review. Genet Program Evol Mach. 2014;15(2):115-67.
54- Gholami MM, Ross BJ. Passive solar building design using genetic programming. Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, 2014 July 12, Vancouver, Canada. New York: Association for Computing Machinery; 2014. pp. 1111-8.
55- Iruthayarajan MW, Baskar S. Evolutionary algorithms based design of multivariable PID controller. Expert Syst Appl. 2009;36(5):9159-67.
56- Hansen N, Ostermeier A. Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: The covariance matrix adaptation. Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996 May 20-22, Nagoya, Japan. Piscataway: IEEE; 1996.
57- Kämpf JH, Robinson D. A hybrid CMA-ES and HDE optimisation algorithm with application to solar energy potential. Appl Soft Comput. 2009;9(2):738-45.
58- Storn R, Price K. Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. J Glob Optim. 1997;11(4):341-59.
59- Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks, 1995 November 27-1 December, Perth, Australia. Piscataway: IEEE; 1995.
60- Delgarm N, Sajadi B, Kowsary F, Delgarm S. Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). Appl Energy. 2016;170:293-303.
61- Kennedy J. Particle swarm optimization. Sammut C, Webb GI. Boston: Springer; 2010.
62- Ferrara M, Sirombo E, Monti A, Fabrizio E, Filippi M. Influence of envelope design in the optimization of the

www.SID.ir

Archive of SID

July 27-30, Glasgow, United Kingdom. Glasgow: IBPSA; 2007.
89- Pyeongchan I, Krarti M. Design optimization of energy efficient residential buildings in Tunisia. Build Environ. 2012;58:81-90.
90- Kämpf JH, Wetter M, Robinson D. A comparison of global optimization algorithms with standard benchmark functions and real-world applications using EnergyPlus. J Build Perform Simul. 2010;3(2):103-20.
91- Anderson R, Christensen C, Horowitz S. Program design analysis using BEopt building energy optimization software: Defining a technology pathway leading to new homes with zero peak cooling demand [Report]. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2006 August. Report No.: NREL/CP-550-39821. Contract No.: DE-AC36-99-GO10337.
92- Yuan S, Wang Sh, Tian N. Swarm intelligence optimization and its application in geophysical data inversion. Appl Geophys. 2009;6(2):166-4.
84- Bouchlaghem N. Optimising the design of building envelopes for thermal performance. Autom Constr. 2000;10(1):101-12.
85- Bouchlaghem NM, Letherman KM. Numerical optimization applied to the thermal design of buildings. Build Environ. 1990;25(2):117-24.
86- Eisenhower B, Fonoberov V, Mezic I. Uncertainty-weighted meta-model optimization in building energy models. Proceedings of 1st Building Simulation And Optimization Conference, 2012 September 10-11, Loughborough, UK. Loughborough: IBPSA England; 2012.
87- Juan YK, Gao P, Wang J. A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement. Energy Build. 2010;42(3):290-7.
88- Hamdy M, Hasan A, Siren K. Combination of optimization algorithms for a multi-objective building design problem. IBPSA: 11th International Building Performance Simulation Association Conference, 2007

www.SID.ir