Archive of SID

# کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در طراحی ساختمان (مقایسه تطبیقی ۵ پروژه طراحی‌شده بر پایه الگوریتم ژنتیک)[1]

**مریم صادقیان**
*دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده معماری و شهرسازی ، دانشگاه فردوسی مشهد*
*sadeghian.maryam@mail.um.ac.ir*
**اکرم حسینی***
*دکتری معماری، استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد*
*akram.hosseini@um.ac.ir*

**چکیده**
*با توجه به گسترده شدن دانش‌های مربوط به حوزه ساخت و معماری ساختمان، کنترل همه‌ی پارامترهای تاثیرگذار در معماری به کاری دشوار و پیچیده در طراحی تبدیل شده‌است. با معرفی کامپیوتر به این عرصه علاوه بر استفاده از آن جهت پیاده‌سازی و ارائه طرح، کامپیوتر توانست به عنوان یک کمک طراح در روند طراحی به ایفای نقش بپردازد. با افزایش محبوبیت روش‌های تکاملی به ویژه الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی علوم مختلف، معماری و ساخت نیز از این علم بی‌بهره نمانده و در بازه‌های زمانی مختلف با اهداف گوناگون به استفاده از آن در روند طراحی و اجرای ساختمان پرداخته‌است. ما با بررسی ۵ پروژه ی متاخر طراحی شده با استفاده از این الگوریتم بهینه سازی به مقایسه و بررسی نحوه ی استفاده از الگوریتم، نوع الگوریتم پیاده سازی شده و حوزه کاربرد آن پرداخته ایم. اهداف پیاده‌سازی روش‌های تکاملی در این حوزه از کاری به کار دیگر متفاوت است و طراحان متناسب با کاربری مورد توجه خود متغیرهای مختلفی را در طراحی ساختمان مد نظر قرار داده‌اند. بهینه‌سازی مصرف انرژی از حوزه‌های پر کاربرد برای الگوریتم ژنتیک در پروژه‌های مربوط به ساختمان است.*

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی تکاملی، الگوریتم ژنتیک، روش طراحی، کاربرد کامپیوتر

## ۱. مقدمه

ریزجهان‌های معماری روزبه‌روز گسترش پیدا می‌کنند. تنوع مصالح، تکنولوژی، فرم و دیگر موارد انبوهی از ریزجهان‌ها را در اختیار معماران می‌گذارد. معمار برای کنترل این موضوع نیاز به دستورهایی دارد که به کمک آن روابط بین جهان‌ها را تعریف نماید. قوانین و یا از نگاه طراحی دستورات بهترین بیان‌کننده ارتباطات هستند. (مهدوی نژاد و رفالیان, ۱۳۹۲, ص. ۸۱)

معرفی کامپیوتر به زمینه‌های علمی و مهندسی یکی از مهم‌ترین تحولات انقلابی در تاریخ این رشته‌ها بوده‌است. که جنبه‌های مختلف این رشته‌ها را تحت تاثیر قرار داد. از همه مهم‌تر این که این تغییرات به انسان‌ها در کشف، پیش‌بینی و کنترل طبیعت در مواردی که پنجاه سال پیش حتی قابل تصور نبود، کمک کرد. (Fasoulaki, 2007, p. 2)

کامپیوترها و نرم افزارهای کمک طراحی از زمان ظهور کامپیوتر در محیط های آکادمیک در۱۹۵۰ و به طورخاص معرفی کامپیوترهای شخصی در ۱۹۸۰ تاثیری چشم‌گیر بر طراحی معماری داشته‌است. اگرچه محققان در ابتدا تعاملی در سطح

[1] این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول در رشته معماری با عنوان «توسعه طرح مجموعه آپارتمان‌های مرتفع مشهد مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی تکاملی در فرایند طراحی» است که تحت راهنمایی دکتر اکرم حسینی در دانشگاه معماری و شهرسازی دانشگاه فردوسی مشهد در حال انجام می‌باشد.



www.SID.ir

Archive of SID

گسترده بین کامپیوترها و طراحان پیش بینی می‌کردند اما در ابتدا ابزارهای کامپیوتری صرفا نسخه‌های کامپیوتری از ابزارهای نقشه‌کشی و گرفتن رندر بودند که به طراحان اجازه می‌دادند تا محتوا را سریع‌تر از روش سنتی تولید کنند و اساسا در روند طراحی تغییری ایجاد نکرده‌اند. (Nagy, et al., 2017, p. 1)

اما هدف این است که در بکارگیری ابزار کامپیوتر یک گام فراتر رفته و نه تنها برای شبیه‌سازی بلکه به‌عنوان یک روش مولد نیز از آن استفاده شود. شبیه‌سازی‌ها بطور معمول بصورت سناریو به سناریو بکار می‌روند به‌گونه ای که طراح یک راه‌حل را تولید می‌کند و کامپیوتر متناوبا آن را ارزیابی می‌کند. به‌همین‌دلیل این روش بسیار کند و کسل‌کننده است و در روند طراحی بطور معمول تنها تعداد کمی از سناریوها از گستره وسیع انتخاب‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در تضاد با این روش، روش هدف‌گرا قرار دارد که در آن از کامپیوتر استفاده می‌گردد تا به طور گسترده فضای جست‌وجو را برای یافتن راه‌حل با کارایی بالا برای پاسخ مساله بررسی کند و در این روش کامپیوتر بصورت اتوماتیک گزینه‌های ممکن را تولید و ارزیابی می‌کند و به طراح پاسخ های بهینه یا نزدیک به بهینه برای مساله ارائه می‌دهد. پیشرفت‌ها در ابزارهای محاسباتی برای کاربرد در طراحی با روش‌هایی از رشته هوش مصنوعی همراه گشته‌است که به امکاناتی منتهی می‌گردد که کامپیوترها می توانند کاملا با فرایند طراحی تعامل داشته باشند. (Caldas & Norford, 2002, pp. 173-174)

طراحی مقداری به معنای تعریف مولفه‌های طراحی و برقراری ارتباط بین آن‌هاست، به‌گونه‌ای که مدلی یکپارچه تشکیل دهند. در چنین مدلی تغییر در یک مولفه سایر مولفه‌ها را تحت تاثیر قرار داده و در پی آن کل مدل را با تغییر اعمال شده هماهنگ می‌گردد. نام‌های گوناگون دیگری نیز برای این روش به‌کار می‌رود: طراحی دیجیتالی، طراحی الگوریتمی، طراحی زایا که هرکدام به بخشی از روش‌های مقداری تاکید بیشتری دارند. (مهدوی نژاد و رفالیان, ۱۳۹۲, ص. ۲۶-۲۷)

طراحی مقداری (پارامتریک) به‌عنوان گرایش نوین، زاییده پیشرفت‌های تکنولوژی و ابزارهای دیجیتال و نقش آن‌ها در حل مساله طراحی است. روش‌های مقداری با ایفای نقش در برنامه‌ریزی طراحی، جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها، تحلیل آن‌ها و سپس تبدیل آن‌ها به بنا، شبیه‌سازی و سنجش میزان کارایی طرح و پیش‌بینی آینده طرح و ساخت، به یاری فرایند حل مساله آمده و در طی بسیاری از چالش‌های پیش روی طراح همراه طراح است. به‌عبارت دیگر امروز روش‌های مقداری نقش دستیار طراحی را دارند و بسته به مدیریت طراح و آشنایی وی با قابلیت‌های ابزارهای آن دستیارانی ساده تا حرفه‌ای خواهند بود.

روش‌های مقداری و کامپیوترها هر دو بر اساس منطق و ریاضیات عمل می‌کنند، اما چنان که می‌دانیم کامپیوترها محاسباتی را فراهم ساخته‌اند که بدون وجود آن‌ها، اجرای آن برای کاربر انسانی غیر ممکن بوده و یا نیاز به صرف انرژی و زمان بسیاری دارند. (رفالیان،۱۳۸۹)

امروزه معماری در پی رسیدن به رفتار همزیستانه و سازگار با محیط است که از اصلی ترین خصوصیات محیط طبیعی است و عامل پیدایش این ویژگیها در طبیعت، فرآیند تکامل آنهاست. از این رو برای دستیابی به ویژگی هایی چون سازگاری و بهینه شدن در معماری، «فرایند تکامل» مطرح است. (وفامهر و همکاران، ۱۳۹۰)

مهندسین و معماران به اینسو می روند که از کمک های محاسباتی در تحلیل و حل مسائل پیچیده طراحی استفاده کنند. (Cichock et al., 2017, p. 152) افزایش ناگهانی محبوبیت استفاده از تکنیک‌های تکاملی در حوزه های تحقیقاتی دیده می‌شود. این محبوبیت نشان دهنده ی توانایی آن‌ها به عنوان ابزار طراحی و ابزار یافتن راه‌حل بهینه در فضاهای جستجوی چندجمله ای پیچیده است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیکی و انبوه ذرات به الگوریتم‌های موثر و کارآمد برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده تبدیل شده اند(Juneja & Nagar, 2016, p. 1).

محاسبات و روش تحلیل‌های کمی در کمک به تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر کارایی نقش مهمی دارد. خصوصا در صورت اطلاعات کم و اهداف زیاد که با یکدیگر تضاد دارند. بهینه‌سازی فراابتکاری این پتانسیل را دارد تا دید عمیق‌تری در طراحی فضاها به کاربر بدهد وقتی که راه‌حل‌های مرتبط با عملکرد را با توجه به اهداف در نظر می‌گیرد، با حفظ یک مقدار متعادل از همگرایی و واگرایی منجر به طرحی خلاقانه گردند (Dino & Üçoluk, 2017, p. 1).



www.SID.ir

Archive of SID

## ۲. پیشینه تحقیق

با اینکه ایده‌ی تکامل در معماری، پس از چارز داروین (۱۸۵۹) مطرح شده، واقعیت این است که قبل از انتشار کتاب داروین، ایده‌ی تکامل درتئوری‌های معماران و تئوری‌پردازانی چون سمپر و یوله لودو، ظهور پیدا کرده‌بود.

بطور کلی ایده‌ی تکامل را می‌توان همانطور که در طبیعت بکار می‌رود در تمامی مراحل، از آغاز معماری تا کنون مشاهده کرد یعنی برای دست یافتن به نتیجه مطلوب مانند طبیعت نمونه‌ها را درمقیاس اصلی ساخت و از ارزیابی نمونه ساخته شده، به تکامل طرح رسید.

اما به کار بردن چنین روشی مستلزم صرف هزینه و وقت است که دیگر منطقی نیست. از این رو نزدیک به چند دهه است که مدل سازی کامپیوتری جای الگو سازی به روش سنتی را گرفته است. ولی در معماری این تکنیک شبیه سـ ازی پس از اتمام مرحله‌ی طراحی به کار می رود و تنها می توان، اصلاحات کوچکی در طرح اعمال نمود. حال آنکه به روش جدیدی نیاز داریم که درآن مدل کامپیوتری در مرحله‌ی طراحی مورد استفاده قرار گیرد تا توسط آن به طرحی برسیم که در آن تمامی حالات و مسیرهای مختلف در نظر گرفته و بررسی شده باشند (وفامهر و همکاران، ۱۳۹۰).

امروزه برخی معماران روش نوینی را در طراحی پیش گرفته اند که معماری تکاملی نامیده می‌شود و با هدف رسیدن به سازگاری در معماری از فرآیند تکامل در طبیعت بهره می‌گیرند. روش‌های تکاملی حل مسئله و الگوریتم ژنتیک از اوایل دهه ۶۰ میلادی تعریف شدند. این روش‌ها اولین بار در مقاله افرادی مانند لاورنس جی فوگل مطرح شدند و پس از آن در دهه ۷۰ میلادی افرادی چون جان هالند[۲] و اینگو ریچنبرگ[۳] مطالعات این زمینه را گسترش دادند. این روش‌ها پس از انتشار کتاب ساعت ساز کور توسط ریچارد داوکین[۴] که شامل برنامه ای ساده مبتنی بر این روش‌ها بود بیش از پیش مطرح گشته و همزمان با رشد کیفیت سیستم‌های کامپیوتری خانگی بسیار مورد اقبال عمومی قرار گرفتند و امکان استفاده از روش‌های تکاملی برای حل مسائل نو ایجاد شد (جعفری، ۱۳۹۳).

معماران مختلفی در سراسر دنیا بر روی این موضوع کار می کنند و این شیوه را با نام های مختلفی معرفی کرده اند . یکی از معروف‌ترین این افراد جان فریزر[۵] است که واژه‌ی معماری تکاملی را ابداع کرده است.

روش‌های نخستین استفاده از این نوع الگوریتم‌ها در معماری، در سال ۱۹۶۰ توسط جان فریزر در کتاب "معماری منقلب" معرفی گردید. نتیجه پژوهش‌های وی، منتهی به ایده طراحی فضایی پاسخگو به نیازهای مختلف بود و در بیشتر موارد مسیر فعالیت‌های وی، ساختار خودساز مدل مطالعاتی مطرح بود که در محیطی پویا انجام می‌گرفت. که منجر به رویکردی با عنوان فرایند طراحی پارامتریک در مسیر کنترل پارامترهای مؤثر بر طراحی شد (مردمی و همکاران، ۱۳۹۴).

از آنجا که در سال ۱۹۹۰ یک جهت‌گیری در راه معماران آوانگارد به وجود آمد، معماران آوانگارد فن‌آوری‌های زیست شناسی تکاملی را با پیچیدگی افزایش یافته‌ی آن که متوجه معماری امروز است به تصویر کشیدند. به طرح کامل روش‌های منطقی و استفاده از آن‌ها در طراحی معماری می‌پردازد. بعنوان یک تحقیق کامل بهره برداری از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی در طراحی توسط caldas و Norford در سال ۱۹۹۹ بررسی شد (Sakamoto et al., 1999).

جیرو در سال ۲۰۰۵ چهارچوبی تحت عنوان FBS در طراحی را معرفی می‌نماید که به بیان‌های گوناگون در طراحی دیجیتال به‌کار گرفته می‌شود (رفالیان، ۱۳۸۹).

به طور کلی الگوریتم‌های ژنتیک از حدود سال ۱۹۹۹ بدلیل ثبات خاص و اجرای نسبتا ساده آن به حوزه طراحی معماری معرفی گردید. از آن به بعد، از آن‌ها بطور ویژه در بهینه‌سازی طراحی پلان‌های طبقات، سایت‌پلان‌ها، بهینه‌سازی‌های طراحی نما، بهینه‌سازی سازه فرم‌های ساختمانی و در چند طرح مفهومی استفاده شد. اگرچه برخلاف دیگر زمینه‌های تحقیقاتی کاملا

[2] John Holland
[3] Ingo Rechenberg
[4] Richard Dawkins
[5] John Frazer



www.SID.ir

Archive of SID

علمی، مسائل در طراحی‌های معماری اغلب با عوامل زیبایی‌شناسی و اجتماعی ترکیب می‌شود که نمی‌تواند به طور کامل با مدل‌های ریاضیاتی بیان شود (Li, 2012, p. 392).

## ۳. بهینه‌سازی و انواع آن

بهینه‌سازی روشی برای جستجوی بهترین راه‌حل در یک شرایط خاص است. بسیاری از مسائل بهینه‌سازی عملی همانند مسائل نظری جستجویی برای "بهترین" پیکربندی از متغیرها برای دستیابی به اهداف هستند. (Blum & Roli, 2003, p. 269)

مهندسان نیاز به تصمیم‌گیری در مورد مسائل تکنولوژیک و مدیریتی برای طراحی، ساخت و نگهداری سیستم‌ها دارند. حداقل تلاش برای به حداکثر رساندن خروجی مورد نظر مهم‌ترین جنبه‌ی تصمیم‌گیری برای جستجو است. بنابراین، مجموعه تلاش‌هایی که باید انجام شود تا به خروجی مورد نظر دست پیدا کرد، یک تابع از متغیرهای خاص می‌باشد که باید برای رسیدن به مطلوب ترین حالت آن عملکرد بهینه گردد (Datta et al. , 2019, p. 1).

روش‌ها یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی به افراد در یافتن پاسخ های بهینه یا نزدیک به بهینه کمک می‌کنند. الگوریتم‌های معین، اکتشافی و فرااکتشافی سه دسته اصلی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هستند.

در الگوریتم‌های معین[۶]، یک رابطه روشن بین ویژگی‌های سیستم وجود دارد. حل مساله با روش معین، زمانی که رابطه بین پارامترهای سیستم و تابع هدف (تناسب) پیچیده یا مبهم می‌شود، سخت می‌گردد. (همان، ۳) این نوع الگوریتم در پ ی یافتن پاسخ دقیق برای مساله است، اما "مسائل پیچیده در دنیای واقعی ممکن است از جستجوی یک راه‌حل بهینه یا حتی عملی یک بهینه ساز در یک تلاش منطقی جلوگیری کنند.

در در آن سوی دیگر بهینه‌سازی های اکتشافی می‌توانند حداقل راه‌حل‌های امکان پذیر را با حداقل نیاز به زمان و ذخیره‌سازی تولید کنند. (Zanakis & Evans, 1981, p. 86) یک الگوریتم اکتشافی[۷] اطلاعات مربوط به سیستم را جمع آوری می‌کند و راه‌حل‌های تصادفی را تست کرده و تصمیم گیری ای برای تولید راه‌حل بعدی صورت می‌دهد. بنابراین، این روش‌ها به ماهیت مساله وابسته هستند. (Datta et al., 2019, p. 3) این الگوریتم برای یافتن راه‌حل نزدیک به بهینه طراحی شده‌است (Hansen et al., 2010, p. 96).

از سوی دیگر، در طی بیست سال گذشته، محبوبیت الگوریتم‌های فرااکتشافی[۸]، در سراسر علوم فیزیکی و اجتماعی افزایش یافته است. (همان) این الگوریتم اکتشاف‌ها و تابع هدف را بدون وابستگی به ساختار مسئله به صورت کارامد ترکیب می‌کند. (Datta et al., 2019, p. 3) یکی از مزایای رویکرد فراشناختی اجتناب از گیر افتادن در یک راه‌حل محلی است. به این معنا که این روش به گستره وسیعی از راه‌حل‌های ممکن در زمان کم دست پیدا می‌کنند (Hansen et al., 2010, p. 96).

### ۳-۱. روش بهینه‌سازی فرااکتشافی

روش‌های فرااکتشافی استراتژی‌هایی هستند که راهنمای روند جستجو هستند. به طور خلاصه، می‌توان گفت که الگوریتم‌های فرااکتشافی استراتژی‌های سطح بالا برای جستجوی فضاهای جستجو با استفاده از روش‌های مختلف هستند. (Blum & Roli, 2003, p. 271) تکنیک‌های فرااکتشافی راهنمایی و اصلاح سایر راه‌حل‌های اکتشافی را که در تلاش برای بهینه‌سازی محلی تولید می شوند بر عهده دارند.(Mukherjee & Ray, 2006, p. 22).

مفاهیم تکنیک‌های بهینه‌سازی فرااکتشافی در برنامه‌های کاربردی واقعی به دلیل استحکام و توانایی آن‌ها برای مقابله با مسائل طراحی پیچیده بیشتر و بیشتر پذیرفته می‌شوند. تکنیک‌های فراشناختی می تواند به طور گسترده‌ای به سه گروه تقسیم شود. اولین گروه محاسباتی تکاملی است که شامل الگوریتم ژنتیک و سایر الگوریتم‌های این گروه می‌باشد. گروه دوم

6 Deterministic algorithm

7 heuristic

8 metaheuristic



www.SID.ir

Archive of SID

به گروه هوش ذرات متشکل از بهینه‌سازی انبوه ذرات، بهینه‌سازی مورچه‌ها و غیره اشاره می‌کند. گروه سوم شامل تکنیک های بهینه‌سازی فیزیکی و الهام گرفته از فیزیک است و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده[9] شایع ترین ابزار بهینه‌سازی در این گروه است (Datta et al., 2019, p. 4).

### ۳-۱-۱. بهینه‌سازی تکاملی (الگوریتم‌های تکاملی)

در بین سه گروه فوق دو گروه اول که به نام الگوریتم‌های بیولوژیک شناخته می شوند، ریشه در مبانی زیست شناسی تکاملی دارند. زیست‌شناسی تکاملی منشاء، تغییرات و تکثیر گونه‌ها در طی زمان را مطالعه می‌کند. در زیست‌شناسی تکاملی با مجوعه‌ای عظیم از توالی نسل‌ها روبرو هستیم که نتایج مطلوب عضوهایی هستند که می‌توانند در محیط زنده بمانند و تولید مثل کنند. با توجه به این واقعیت، زیست شناسی تکاملی یک منبع خوب برای الهام در پرداختن به مشکلات محاسباتی پیچیده است که در آن نیاز به جست‌وجو در تعداد زیاد راه‌حل‌های احتمالی است. علاوه براین، تکامل می‌تواند به عنوان مجموعه روش‌های موازی جست‌وجو دیده شود. به‌جای این که در یک زمان بر روی یک گونه کار کند، تکامل همه‌ی جمعیت گونه‌ها را بصورت همزمان آزمایش می‌کند و تغییر می‌دهد. روش طبیعی تکامل در زندگی و تکنیک‌هایی که در زیست‌شناسی تکاملی استفاده می‌شود، بسیاری دیگر از رشته‌ها را جهت حل مسائل تحت تاثیر قرار داده‌است(Fasoulaki, 2007, p. 2).

در سال‌های اخیر، تکنیک تکامل به یک زمینه تحقیق جذاب تبدیل شده‌است. این نه تنها به دلیل کارآیی آن در بهینه‌سازی، علاوه برآن به دلیل وابستگی آن به سیستم‌های اجتماعی و طبیعی است. این تکنیک ها بر پایه‌ی تکامل بیولوژیکی استوار هستند. آن‌ها از روش‌هایی مانند تولید مثل، جهش، بازسازی و انتخاب طبیعی برای تولید راه‌حل‌های مناسب استفاده می کنند. به طور کلی فضای مساله که متشکل از هماهنگی عملگرهایی مانند جهش، ترکیب و غیره است. مقادیری که باید حفظ شوند، بر اساس یک تابع هزینه تعیین می‌شود که به نوبه خود مناسب بودن راه‌حل‌های کاندید را تعیین می‌کند. سپس این روند بارها تکرار می‌گردد.

ایده اساسی و ویژگی‌های اصلی الگوریتم‌های تکاملی رقابت بین جمعیت افراد می‌باشد که به قدرت تئوری "بقای مناسب‌ترین" در محیط است که به افزایش تناسب در جمعیت می‌افزاید. ویژگی‌های اصلی الگوریتم‌های تکاملی به شرح زیر است:

- الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر جمعیت هستند، به عنوان مثال، آن‌ها مجموعه‌ای از راه‌حل‌های کاندید را به طور همزمان پردازش می‌کنند.
- الگوریتم‌های تکاملی اغلب ازترکیب استفاده می‌کنند تا با اطلاعاتی که از شمار زیادی از راه‌حل‌های کاندید بدست‌آورده‌اند به یک راه‌حل جدید برسند.
- الگوریتم‌های تکاملی ابزارهای تصادفی یا رندم برای بهینه‌سازی هستند(Juneja & Nagar, 2016, p. 1).

روش‌های محاسبات تکاملی[10](EC) دارای تاریخ غنی هستند. با توسعه دستگاه‌های محاسباتی و خواسته‌های فرآیندهای صنعتی، درحالی که دانش پیشینی (فرضیه ها) در مورد مسئله بهینه‌سازی برای کاربرد یک روش کلاسیک بهینه‌سازی وجود ندارد، نیاز به حل برخی از مسائل بهینه‌سازی وجود دارد. در این زمینه، روش EC به‌عنوان گزینه‌ی بهینه‌سازی ارائه شده‌است. تکنیک EC یک روش کلی برای حل مسائل بهینه‌سازی است که تابع هدف را عموما بدون استفاده از بینش عمیق‌تر و با توجه خواص ریاضی آن به شیوه انتزاعی و کارآمد مورد استفاده قرار می دهد، درروش‌های محاسبات تکاملی نیازی به فرضیه برای مساله بهینه‌سازی و دانش پیشین در مورد تابع هدف نیست. برجسته‌ترین و جذاب‌ترین روش‌های محاسبات تکاملی، روش‌هایی است که در مورد ساختار یک مساله بهینه‌سازی دانش بدست‌می‌آورند و با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده راه‌حل‌های ممکن در گذشته را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. آن‌ها از این دانش برای ساختن راه‌حل‌های جدید استفاده می‌شود که احتمالا کیفیت بهتری دارند (Cuevas et al., 2019, p. 4).

[9] simulated annealing
[10] evolutionary computing



www.SID.ir

یک نوع خاص از این الگوریتم‌های محاسباتی الگوریتم‌های ژنتیک هستند. الگوریتم ژنتیک رایج‌ترین الگوریتم تکاملی است که بعضی اوقات با برخی از تکنیک‌های تحقیقاتی دیگر ترکیب شده‌است. (Rodrigues et al., 2013, p. 4) اما همانطور که گفته شد الگوریتم‌های محاسباتی دیگری نیز وجود دارد. برنامه ریزی ژنتیک[11]، استراژی‌های تکاملی[12]، الگوریتم تکاملی تفاضلی[13](DE) ، برنامه‌ریزی بیان تکاملی[14] ازدیگر نمونه الگوریتم‌های محاسبات تکاملی می‌باشد.

### ۴. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک که به عنوان روش‌های تصادفی برای حل مسائل بهینه‌سازی و جستجو استفاده می‌شود، شامل عملیاتی بر روی یک جمعیت از راه‌حل های ممکن است. با توجه به نظریه تکامل داروین، استفاده مکرر از روش‌های ذکر شده گونه‌های اولیه را به دیگر گونه ها تغییر می‌دهد. با این حال، تنها قوی‌تر پیروز می‌شود و فقط آن دسته که به‌عنوان راه‌حل بهتراند باز می‌مانند(Fasoulaki, 2007).

الگوریتم ژنتیک یک دسته از تکنیک‌های حل مسئله فوق اکتشافی تکاملی است که بر اساس قوانین تکامل زیستی می‌باشد. روش اصلی الگوریتم‌های ژنتیک هدایت یک جست‌وجو تصادفی است که به‌تدریج یک جمعیت را که برازندگی بیشتری دارند، بهبود ببخشد. افراد جدید با عملگرهای ترکیب جدید که ماده ژنتیک ی موجود با برازندگی بالا را استخراج می‌کنند و عمل‌گرهای جهش که جست‌وجو را به نواحی کشف‌نشده در محیط برازندگی گسترش می‌دهند. الگوریتم ژنتیک برای فضاهای جست‌وجوهای بزرگ، چند ماژوله و ناپیوسته درجایی که هزینه‌ی یافتن بهترین پاسخ بالاست و راه‌حل‌های به اندازه کافی خوب کفایت می‌کند، کارامد است (Coello Coello, 2002) .

اگرچه یک تعریف رسمی از الگوریتم‌های ژنتیک وجود ندارد، اما همه‌ی آن‌ها از ۴ عنصر تشکیل‌شده‌اند:

اولین آن‌ها (جمعیت کروموزوم‌ها) است که پاسخ‌های احتمالی برای مساله هستند.

انتخاب (Selection) عنصر دوم است و به بخشی از جمعیت اشاره می‌کند که به نسل بعدی تکامل خواهند یافت. انتخاب براساس یک تابع برازندگی انجام خواهدشد که تعیین می‌کند که یک پاسخ چه اندازه خوب است.

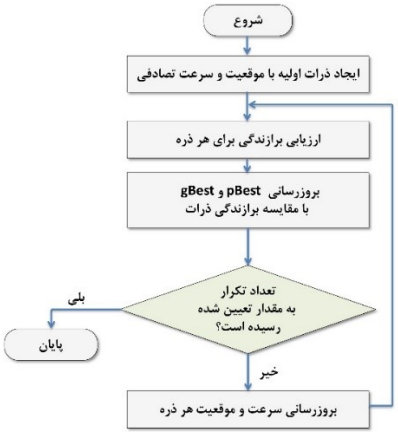
عملگر ترکیب (Crossover) به ترکیب و تبادل ویژگی‌ها بین دو عضو از گروه انتخاب شده می‌گویند که به‌وسیله آن فرزندان تولید می‌شوند. انواع زیادی از ترکیب وجود دارد مانند ترکیب تک نقطه ای و دو نقطه ای.

قبل از اعمال دوباره انتخاب بر جمعیت جدید، جهش (Mutation) اتفاق می‌افتد. جهش یک رویدد تصادفی است که با یک احتمال تعریف‌شده توسط کاربر تنها بر روی برخی از فرزندان اعمال می‌شود تا تنوع ژنتیکی را با تغییر تنها قسمتی از فرزندان جدید حفظ کند (Fasoulaki 2007, 3).

[11] Genetic Programming
[12] Evolution Strategies
[13] Differential Evolution
[14] Evolutionary Expression Programming



www.SID.ir




تصویر ۱. مراحل الگوریتم ژنتیک. بر اساس: (Sivanandam & Deepa, 2008, p. 32)

### ۴-۱. انواع الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک دارای انواع مختلفی است که می‌توان آن را با آن دسته‌بندی نمود:

از نظر تعداد اهداف در پیاده سازی الگوریتم، الگوریتم ژنتیک از عهده مسائل تک هدفه و هم چند هدفه بر می‌آید.

انواع دیگر الگوریتم ژنتیک نیز بر اساس نوع کاربرد و پیاده‌سازی آن‌ها موجود است که با توجه به هدف هر پـروژه از آن‌هـا استفاده می‌گردد.

#### ۴-۱-۱. الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه[15]

در الگوریتم‌های ژنتیک تک‌هدفه (SOGA)، وزن انتخاب مطابق با تنها یک معیار برازندگی است که باید کمینه یا بیشینه باشد. الگوریتم‌های ژنتیک تک هدفه می‌تواند همچنین در مسائل چندهدفه به‌وسیله تجمیع چندین مقدار برازندگی در یک تابع تک هدفه استفاده‌شوند (Coello 2002).

#### ۴-۱-۲. الگوریتم ژنتیک چندهدفه[16]

در این موارد هر هدف وزن داده‌می‌شود تا خود را نسبت به دیگر معیارها به تعادل برساند. زمانی‌که با اهداف چندگانه روبرو هستیم، یک الگوریتم چندهدفه (MOGA) به دنبال مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه است(Dino and Üçoluk 2017, 1).

#### ۴-۱-۳. الگوریتم ژنتیک تعاملی[17](IGA)

الگوریتم ژنتیک تعاملی (IGA) از روش‌های محاسبات تکاملی و به طور خاص، روشی برای محاسبه تعاملی تکاملی است این روش ارزیابی را با ارزیابی ذهنی کاربران بر اساس عملیات ژنتیکی جایگزین می‌کند. این روش به طور کلی برای تولید موسیقی یا طرح‌هایی که ارزیابی کمی دشوار است، به عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل ساختار پیچیده حساسیت انسان کاربرد دارد. مطالعات نشان‌دهنده شروع کابرد این روش از ابتدای معرفی الگوریتم ژنتیک می‌باشد (Koma et al., p. 2).

#### ۴-۱-۴. الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب[18] (NSGA و NSGA-II)

[15] Single-objective Genetic Algorithm
[16] Multi-objective Genetic Algorithm
[17] Interactive Genetic Algorithm
[18] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm



www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب یک الگوریتم تکاملی چند هدفه و گسترش یافته‌ی الگوریتم ژنتیک است. دو نسخه از این الگوریتم وجود دارد که (NSGA-II) نسخه بروز شده آن است. (Brownlee, 2011).

این الگوریتم به‌عنوان یکی از الگوریتم های ژنتیک چند هدفه برای بهینه سازی پارامترهای فرایند اجرایی ماشینی طبقه‌بندی می‌گردد. NSGA-II یک الگوریتم شناخته شده، با رتبه‌بندی سریع و کاملا چندهدفه می‌باشد که بر خلاف الگوریتم‌های تک‌هدفه هر هدف را بدون تاثیر گرفتن از هیچ راه‌حل دیگری بهینه می‌سازد (Yusoff et al., 2011, p. 3979).

## ۵. روش تحقیق و سوالات تحقیق

جهت بررسی چگونگی استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه ساختمان‌ها تعداد ۵ پروژه از متاخرترین آثاری که به صورت ساخته‌شده و یا طراحی شده از این رویکرد استفاده نموده اند مورد بررسی قرار گرفت. در انتخاب نمونه‌های موردی تنوع اهداف استفاده از این الگوریتم مورد توجه قرار گرفته‌است. بررسی‌ها به منظور جمع‌آوری داده، جهت پاسخ‌گویی به سوالات زیر به عنوان سوالات اصلی تحقیق انجام شد.

۱- الگوریتم‌های ژنتیک جهت تحقق کدام یک از اهداف ساخت کاربرد دارند و متغیرهایی مساله طراحی آن چه هستند؟

۲- کدام یک از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک در این پروژه ها مورد استفاده قرار گرفته است؟

۳-این پروژه‌ها دارای چه کاربری و فعالیتی هستند؟

۴- این پروژه ها تا چه میزان قابلیت اجرایی شدن دارند؟

بنابراین اهداف بهینه‌سازی پروژه، متغیرهای بررسی شده، نوع الگوریتم ژنتیک، کاربری بنای بهینه‌سازی‌شده و اجرایی بودن آن‌ها ابتدا در هر نمونه طبقه‌بندی گردید و بر اساس موضوعات و متغیرهای پروژه مورد مقایسه تطبیقی قرار گرفت.

## ۶. زمینه های کاربرد الگوریتم ژنتیک در ساختمان

باتوجه به تحقیقات انجام شده، این‌گونه به‌نظر می‌رسد که الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی همساز با حفظ تأثیر چندین پارامتر می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر، فرایند تطبیق عملکرد میان سازه و معماری را پدید آورد. (مردمی و همکاران، ۱۳۹۴)

اهداف بهینه‌سازی از کاری به کار دیگر متفاوت است و این هدف ممکن است هندسی، توپولوژی، مربوط به بهره‌وری انرژی (گرمایش، سرمایش و نورپردازی) یا فاصله پیاده‌روی بین فضاها است. متغیرهای طراحی ممکن است ابعاد دیوار، درهای بیرونی، پنجره های خارجی، درهای داخلی، فضای به عنوان چندضلعی‌های بسته، طبقات پلان، مبلمان و وسایل، مرز ساختمان، یا ساختمان‌های مجاور باشد. ویژگی‌های توپولوژیکی مانند جهت‌گیری بازشوها، به عنوان مثال دید و منظر یک پنجره و الزامات مجاورت بین فضاها باشد. اغلب از این روش‌ها بطور هم‌زمان استفاده نمی‌گردد (Rodrigues et al., 2013, p. 4).

امروزه از ساختار الگوریتم ژنتیک در جانمایی دسترسی‌های فضاهای شهری، حوزه طراحی شهری، بهینه‌یابی جانمایی عناصر سازه‌ای در طراحی سازه‌های خاص، بررسی جانمایی فضاهای معماری و کنترل روابط فضایی بهینه در معماری و مثال‌های متعدد حوزه‌های دیگر استفاده می‌گردد که تجمیع این مسائل با مجموعه عوامل مؤثری همچون انرژی و نیروهای محیطی مسیر دستیابی به تصمیمات کارآمدتر را ممکن ساخته‌است (مردمی و همکاران، ۱۳۹۴) .

در این تحقیق به بررسی و تحلیل ۵ پروژه طراحی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌پردازیم ونتایج بررسی آن را به صورت مقایسه‌ای بیان می‌شود.

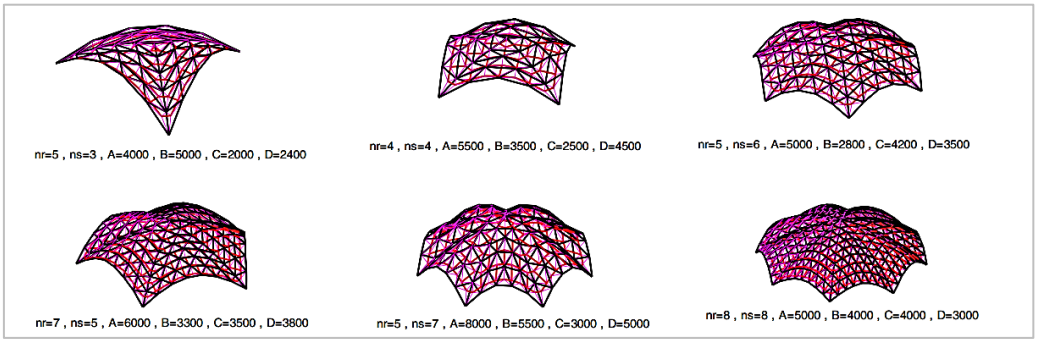
### ۶-۱. طراحی سازه گنبد فضاکار(۲۰۱۶)

در طراحی سازه‌های مورد بحث در این پروژه از یک استراتژی جدید با استفاده از منطق فازی FL و الگوریتم ژنتیک ساخته شده، استفاده گردیده‌است. در یک نمونه از طرح‌های ارائه‌شده مساله اصلی رسیدن به ارتفاع بهینه در عین توجه به مسائل معماری (ارتفاع بلند) و مسائل سازه‌ای (وزن کمتر) بصورت همزمان است. نمونه دیگر بر مسائل هندسی و توپولوژیکی


www.SID.ir

Archive of SID

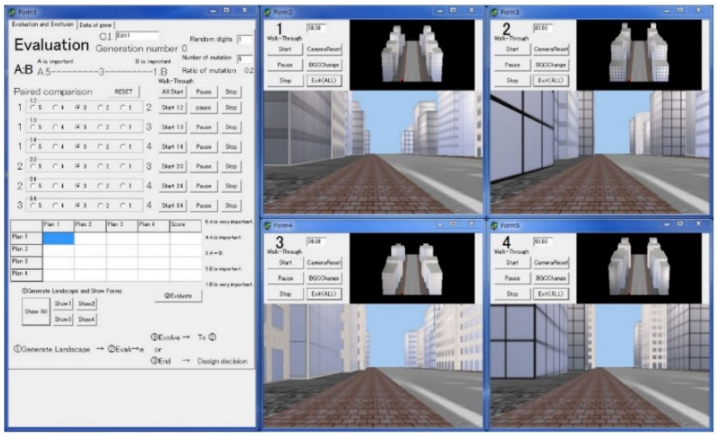
تمرکز دارد و طرح نهایی براساس تصمیمی است که طراحان در مورد تعداد حلقه‌ها، بخش‌ها، بالارفتن تاج و حداکثر طول المان‌ها گرفته‌اند (Babaei & Sheidaii, 2016).




تصویر ۲. طراحی سازه گنبد فضاکار با استفاده از الگوریتم ژنتیک. (همان)

### ۶-۲. خیابان Kyomachi-suji در کوبه-ژاپن (۲۰۱۷)

در این مطالعه، یک سیستم بهینه‌سازی برای طراحی منظر شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعاملی (IGA) ارائه‌شده‌است. در این سیستم سه ویژگی از یک منظره شهری، یعنی موقعیت‌های سطح دیوار، ارتفاعات و ساختمان وجود دارد. خیابان Kyomachi-suji در Chuo-ku در شهر کوبه به‌عنوان مدل نمای خیابان برای ساختمان‌های اداری نشان‌داده‌شده‌است، که در آن نقشه‌ها با توجه به سه عنصر فوق مورد بررسی قرار گرفتند (Koma et al., 2017).

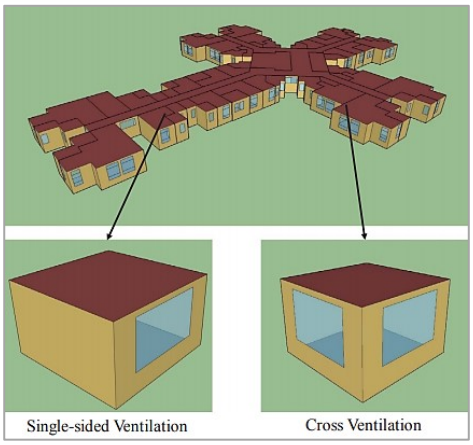



تصویر۳. طراحی منظر شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک. (همان)

### ۶-۳. مسکن عمومی اجاره‌ای (PRH) درشهرهای پرجمعیت (۲۰۱۷)

پروژه مورد نظریک قالب معمولی برای ساختمان‌های مسکونی مرتفع برای شهرهای پرجمعیت مانند هنگ کنگ یا لس آنجلس را ارائه می‌دهد. برای تسریع در پیشرفت مدل سازی، کل ساختمان را با تکثیر این طبقه نشان‌می‌دهد. با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و بهینه سازی ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) به صورت چند هدفه یک مدل عمومی که یک نمونه بلند مرتبه معمولی را در هر دو حالت تهویه یک طرفه و تهویه متقابل نشان‌می‌دهد، ساخته شده‌است. ترجیحات طراحی فوق می‌تواند به تفاوت در چهار شاخص اصلی آب و هوا یعنی دمای خشک در فضای باز، رطوبت نسبی، سطح تابش و سرعت باد نسبت داده شود (Chen & Yang, 2017).


www.SID.ir




تصویر ۴. طراحی مسکن عمومی اجاره‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک. (همان)

### ۶-۴. ساختمان اداری اتودسک در تورنتو- کانادا (۲۰۱۷ - ۲۰۱۸)

اغلب آثار منتشر شده در این زمینه در حد تحقیقات ارائه شده‌اند و به عنوان یک پروژه واقعی اجرا نگردیده‌اند. یکی از این آثار با عنوان "جستجوی طرح: کاربرد طراحی زایا در برنامه‌ریزی فضای معماری" که در سال ۲۰۱۷ توسط ناجی و همکاران[۱۹] از (دفتر Living متعلق به کمپانی Autodesk در نیویورک) ارائه‌گردیده‌است، مراحل توسعه یک طرح برای فضای اداری جدید Autodesk در تورنتو[۲۰] شرح داده‌شده‌است. برای طراحی این پروژه که در سال ۲۰۱۸ اجرای آن به اتمام رسیده است، شش هدف منحصر به فرد که طرح را بر اساس عملکرد معماری و ترجیحات کارکنان درنظر گرفته شده‌است که با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) در کلیه ابعاد مورد ارزیابی قرارمی‌گیرند. (Nagy, et al., 2017) این اهداف جنبه‌های کیفی تجربه انسانی (شامل ترجیحات روش کار، ترجیحات مجاورت فضاها و دید به بیرون) را با جنبه‌های کمی آن شامل (نور روز، ازدحام و بهره‌وری) ترکیب می‌کند (Autodesk, 2019).

تصویر ۵. اهداف طراحی ساختمان اداری اتودسک با استفاده از الگوریتم ژنتیک. (همان)

### ۶-۵. ساختمان اداری با تهویه مطبوع در سنگاپور (۲۰۱۸)

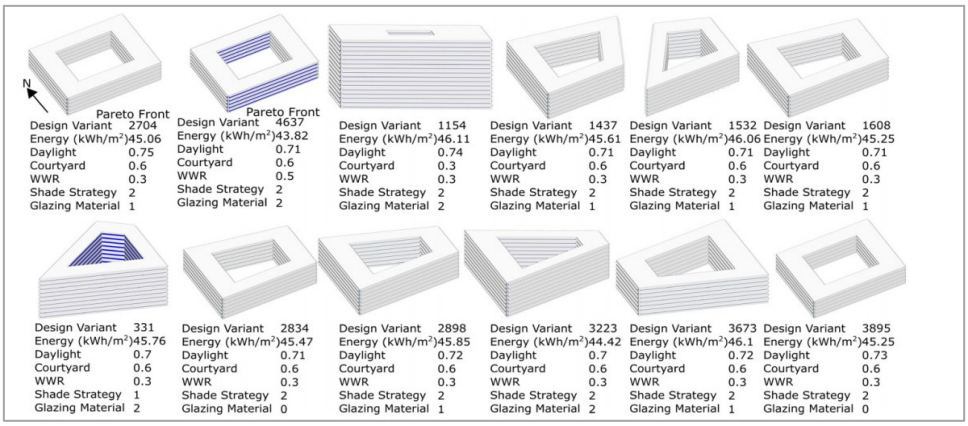
فرایند بهینه‌سازی در نمونه مورد مطالعه یک ساختمان اداری با تهویه مطبوع واقع در سنگاپور است که طراح به کاوش در گونه‌شناسی حیاط به‌عنوان یک عنصر طراحی معماری پرداخته است. توجه به ۴ پارامتر مساله اصلی اساس طراحی در این نمونه براساس الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) است. نسبت حیاط به توده، نسبت پنجره‌ها به دیوارها، سایه‌اندازی و کنترل مصرف انرژی وخنک‌سازی ساختمان از مسائل مورد توجه در این پروژه است (Chen et al., 2018).

۱۹

[20] Autodesk offices in the MaRS Discovery District in Toronto



www.SID.ir




تصویر ۶. فرایند طراحی ساختمان اداری با تهویه مطبوع با استفاده از الگوریتم ژنتیک. (همان)

### ۷. تحلیل نمونه های موردی

پس از بررسی پروژه‌های مورد نظر، نتایج مقایسه آن‌ها از حیث نوع الگوریتم استفاده شده جهت طراحی، متغیرهای مورد توجه در پیاده‌سازی الگوریتم و کاربری پروژه در جدول۱ ارائه گردیده‌است.

جدول ۱. فرایند طراحی ساختمان اداری با تهویه مطبوع با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

| سال طراحی | نام پروژه | نوع الگوریتم | متغیرها | کاربری | وضعیت |
|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰۱۶ | سازه گنبد فضاکار | GA + FS | - گنبد فضاکار<br>- بار وارد بر سازه<br>- فرم‌یابی سقف<br>- فرم‌یابی سازه<br>- طول عناصر سازه ای | نامشخص | طراحی |
| ۲۰۱۷ | خیابان Kyomachi-suji در کوبه-ژاپن | IGA | - پرسپکتیو شهری<br>- موقعیت دیوارها<br>- ارتفاع بافت<br>- پوشش ساختمان‌ها | بافت شهری | طراحی |
| ۲۰۱۷ | مسکن عمومی اجاره‌ای (PRH) درشهرهای پرجمعیت (هنگ کنگ – چین و لس آنجلس- آمریکا) | NSGA-II | - مصرف انرژی<br>- تهویه طبیعی<br>- نور روز<br>- جهت‌گیری بازشو<br>- ابعاد پنجره | مسکونی بلندمرتبه | طراحی |
| ۲۰۱۷<br>۲۰۱۸ | ساختمان اداری اتودسک در تورنتو- کانادا | MOGA | - ابعاد و شکل فضاها<br>- مجاورت فضاها<br>- فاصله فضاها<br>- نور روز<br>- جهت‌گیری بازشو | اداری | اجرا شده |
| ۲۰۱۸ | ساختمان اداری با تهویه مطبوع در سنگاپور | NSGA-II | - فرم یابی کلی<br>- مصرف انرژی<br>- تهویه طبیعی<br>- نور روز<br>- سایه اندازی | اداری | طراحی |

ماخذ:همان.



www.SID.ir

Archive of SID

## ۸. نتیجه‌گیری

الگوریتم‌های بهینه‌سازی و به‌ویژه الگوریتم ژنتیک با گذشت زمان بیش از پیش در علوم مختلف مورد توجه قرار گرفته‌است. صنعت ساختمان به عنوان یک از صنایع در ارتباط مستقیم با انسان از این علم بی‌بهره نمانده است و در این سال‌ها بصورت عملی یا پژوهشی به این علم پرداخته‌است. بررسی مطالعات انجام شده از سال ۱۹۹۷ تاکنون نشان‌دهنده توجه پژوهشگران عرصه مهندسی و ساختمان به این مقوله است. اما بررسی‌ها نشان‌می‌دهد که علی‌رغم رشد بسیار این علم در علوم معماری و ساخت تعداد کمی از پروژه‌های طراحی شده به مرحله ساخت و اجرا رسیده‌اند که نشان‌دهنده نیاز به توجه و تحقیقات بیشتر در این زمینه است.

از بررسی و مقایسه پروژه‌های طرح‌ریزی شده مشخص می‌گردد که روش‌های مختلف تولید شده بهینه‌سازی تکاملی در طی زمان در حل مسائل حوزه ساختمان و معماری و در کاربری‌های مختلف به روش‌های پیشین افزوده شده‌اند. همچنین می‌توان دریافت که اهداف پیاده‌سازی روش‌های تکاملی در این حوزه از کاری به کار دیگر متفاوت است و طراحان متناسب با کاربری مورد توجه خود موارد مختلفی را در طراحی ساختمان مورد نظر قرارداده‌اند. توجه به مصرف انرژی از متغیرهای شاخص در پروژه های طراحی‌شده است. طراحان با توجه به متغیرهای مورد نیاز طراحی خود از گونه‌های مختلف از این الگوریتم بصورت تک‌هدفه و چند هدفه بهره جسته‌اند.

## مراجع

1. Babaei, M., & Sheidaii, M. R. (2016, March ). Desirability-based design of space structures using genetic algorithm and fuzzy logic. International Journal of Civil Engineering, 15(2), 231–245.

2. Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview. *ACM Computing Surveys, Vol. 35, No. 3*, 268–308.

3. Brownlee, J. (2011). Non-dominated Sorting Genetic Algorithm. In J. Brownlee, *Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes.* Lulu.com.

4. Caldas, L., & Norford, L. K. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction 11*, 173–184.

5. Chen, K. W., Janssen, P., & Schlueter, A. (2018, October ). Multi-objective optimisation of building form, envelope and cooling system for improved building energy performance. *Automation in Construction, 94*, 449-457.

6. Chen, X., & Yang, H. (2017, November 15). A multi-stage optimization of passively designed high-rise residential buildings in multiple building operation scenarios. *Applied Energy*, 541-557.

7. Cichock, J. M., Migalska, A., Browne, W. N., & Rodriguez, E. (2017). SILVEREYE– the implementation of Particle Swarm Optimization algorithm in a design optimization tool. *CAAD Futures 2017, CCIS 724* (pp. 151–169). Springer Nature Singapore Pte Ltd.

8. Coello Coello, C. (2002). Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng, 19*(11), 1245-1287.

9. Cuevas, E., Barocio, E., Emilio, E., & Arturo, C. (2019). Introduction to Metaheuristics Methods. In *Metaheuristics Algorithms in Power Systems* (pp. 1 - 8). Springer Nature Switzerland AG 2019.

10. Datta, S., Roy, S., & Davim, J. (2019). Optimization Techniques: An Overview. In *Optimization in Industry* (pp. 1 - 13). Springer Nature Switzerland AG 2019.



www.SID.ir

11. Dino, I. G., & Üçoluk, G. (2017). Multiobjective Design Optimization of Building Space Layout, Energy, and Daylighting Performance. *Journal of Computing in Civil Engineering, 31*(5).

12. Fasoulaki, E. (2007). Genetic Algorithms in Architecture: a Necessity or a Trend? *Generative Art Conference.* Milan, Italy.

13. Hansen, J. M., Raut, S., & Swami, S. (2010). Retail Shelf Allocation: A Comparative Analysis of Heuristic and Meta-Heuristic Approaches. *Journal of Retailing 86 (1, 2010)*, 94–105.

14. Juneja, M., & Nagar, S. (2016). Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review. *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM).* 2016 IEEE.

15. Koma, S., Yamabe, Y., & Tani, A. (2017, February 20). Research on urban landscape design using the interactive genetic algorithm and 3D images. *Visualization in Engineering, 5*(1).

16. Li, L. (2012). The optimization of architectural shape based on Genetic Algorithm, Frontiers of Architectural Research. 392 - 399.

17. Mukherjee, I., & Ray, P. K. (2006). A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering, 50*(1-2), 15–34.

18. Nagy, D., Lau, D., Locke, J., Stoddart, J., Villaggi, L., Wang, R., . . . Benjamin, D. (2017). project Discover: An application of generative design for architectural space planning. *Autodesk Research*.

19. Rodrigues, E., Gaspa, A. R., & Gomes, A. (2013). Evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture Part 1: Methodology. *Computer-Aided Design*.

20. Sakamoto, Y., Nagaiwa, A., Kobayasi, S., & Shinozaki, T. (1999). An optimization method of district heating and cooling plant operation based on genetic algorithm. *ASHRAE Annual Meeting*, (pp. 104-115).

21. Yusoff, Y., Ngadiman, M. S., & Zain, A. M. (2011). Overview of NSGA-II for Optimizing Machining Process Parameters. *Procedia Engineering, 15*, 3978 – 3983.

22. Zanakis, S. H., & Evans, J. R. (1981). Heuristic "Optimization": Why, When, and How to Use It. *Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) INFORMS is located in Maryland*, 84-91.

۲۳. جعفری، ف. (۱۳۹۳). کاربرد الگوریتم ژنتیک در حل مسئله طراحی معماری؛ (نمونه: طراحی مجتمع مسکونی باران). *پایان نامه کارشناسی ارشد رشته معماری فنی دانشکده هنر و معماری دانشگاه تربیت مدرس.*

۲۴. رفالیان، غ. (۱۳۸۹). کاربرد روش‌های مقداری در فرایند طراحی با تاکید به هماهنگی معماری و سازه (نمونه موردی موزه هنرهای اسلامی میدان ونک). پایان نامه کارشناسی ارشد رشته معماری فنی دانشکده هنر و معماری دانشگاه تربیت مدرس.

۲۵. مردمی، ک.، سهیلی فرد، م. و آقا عزیزی، م. (۱۳۹۴). هم‌سازی سازه و معماری در راستای جانمایی بهینه تکیه گاه ها به روش الگوریتم ژنتیک (نمونه موردی: پوشانه های با فرم آزاد، طراحی شده بر اساس هندسه گره ایرانی). فصلنامه علمی- پژوهشی نقش جهان, ۵(۲).



www.SID.ir

۲۶. مهدوی نژاد، م.، و رفالیان، غ. (۱۳۹۲). معماری الگوریتمی: داده نگاری و روش‌های پیشرفته برنامه‌دهی مقداری در فرآیند طراحی معماری معاصر. نشر دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.

۲۷. وفامهر، م.، شمس، م.، و گرشاسبی، ع. (۱۳۹۰). معماری ژنتیکی، الگوبرداری از فرآیند تکامل زیستی. دومین کنفرانس بین المللی معماری و سازه. تهران: دانشگاه تهران.



www.SID.ir