

## بررسی کارایی روشهای بهینه‌سازی تکاملی در دستیابی به اهداف معماری و ساخت

مهندس مریم صادقیان\*\*، دکتر اکرم حسینی\*\*\*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۰۱/۲۶

### مکیده

با افزایش محبوبیت روش‌های بهینه‌سازی در علوم مختلف، معماران نیز با اهداف گوناگون به استفاده از این روش‌ها در طراحی و اجرای ساختمان پرداخته‌اند. نحوه‌ی کارکرد و ویژگی‌های هر کدام، با توجه به جدید بودن آن‌ها در معماری، ناشناخته است. در این تحقیق، ضمن تدوین مبانی روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، با مرور ۷۷ مطالعه پیشین که در حوزه‌ی ساختمان، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند؛ به بررسی میزان کارایی روش‌ها در دستیابی به اهداف معماری و ساخت، به روش تحلیل محتوای متن اقدام می‌گردد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی با شش هدف مختلف در معماری پیاده‌سازی شده‌اند؛ از این اهداف، بیشترین کاربرد مربوط به بهینه‌سازی نظام فضایی در کاربری مسکونی و بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌های اداری است. در بررسی انجام‌شده، الگوریتم ژنتیک پرکاربردترین الگوریتم تکاملی و بهینه‌سازی انبوه ذرات، رایج‌ترین روش در تحقیقات مبتنی بر هوش جمعی است. با توجه به برخورد عمدتاً نظری پژوهشگران با این موضوع، طراحان نیازمند تعاملات بین‌رشته‌ای بیش‌تر با سایر محققین به‌ویژه متخصصین کامپیوتر جهت پیاده‌سازی و عملیاتی شدن کاربرد الگوریتم‌ها می‌باشند.

### واژه‌های کلیدی

بهینه‌سازی، روشهای فرااکتشافی، الگوریتم‌های تکاملی، فرایند طراحی معماری.

\* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد نگارنده اول در رشته‌ی معماری با عنوان «توسعه طرح مجموعه آپارتمان‌های مرتفع مشهد مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی تکاملی در فرایند طراحی» است که به راهنمایی دکتر اکرم حسینی در دانشکده‌ی معماری و شهرسازی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفته است.

\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. Email: sadeghian.maryam@mail.um.ac.ir  
\*\*\* استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. (مسئول مکاتبات) Email: akram.hosseini@um.ac.ir

## مقدمه

تکامل<sup>۱</sup> به معنی کامل شدن و تکامل بیولوژیکی یا ارگانیک، تغییری است که طی نسل‌های متوالی در یک یا چند صفت ارثی در جمعیت به وجود می‌آید (Hall et al., 2008, 21). صفات ارثی، ویژگی‌های متمایزکننده ناشی از تعامل ژن و محیط هستند. منابع اصلی چنین تغییراتی جهش، ترکیب‌های ژنتیکی و جریان ژن‌ها است که باعث ایجاد تنوع در موجودات زنده شده است (Futuyma, 2017, 14). چارلز داروین در سال ۱۸۵۹ نظریه‌ای در مورد منشأ گونه‌ها در اثر «منشأ گونه‌ها با استفاده از انتخاب طبیعی: یا حفظ نژاد مطلوب در رقابت برای زندگی»<sup>۲</sup> منتشر کرد. این نظریه بر اساس چند قانون طبیعی تولیدمثل، وراثت، تنوع و انتخاب طبیعی است؛ که منجر به واگرایی شخصیت‌ها و انقراض گونه‌های کمتر بهبودیافته می‌شود (Feldmeth, 1996). زیست‌شناسی تکاملی منشأ تغییرات و تکثیر گونه‌ها را در طول زمان مطالعه می‌کند و بسیاری از رشته‌ها را تحت تأثیر قرار داده است (Fasoulaki, 2007).

بهینه‌سازی روش جست‌وجوی بهترین پیکربندی از متغیرها برای دستیابی به اهداف است (Blum & Roli, 2003). هر روش محاسباتی که یک یا چند مقدار را دریافت و یک یا چند مقدار خروجی تولید کند، الگوریتم نام دارد. الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی سلسله‌مراتبی از کارهای محاسباتی (Cormen et al., 2009, 5) بر اساس تکامل است که خروجی موردنظر دست پیدا می‌کند (Blum & Roli, 2003). کامپیوتر از مهم‌ترین تحولات در تاریخ رشته‌های علمی بوده و به انسان در کشف، پیش‌بینی و کنترل طبیعت کمک کرده است (Fasoulaki, 2007). بدون کامپیوترها انجام برخی محاسبات غیرممکن و یا همراه با صرف انرژی و زمان بسیار است (Cichock et al., 2017).

در این تحقیق، ضمن بررسی مبانی موضوع بهینه‌سازی تکاملی، ۷۷ تحقیق که در حوزه ساختمان، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند؛ به روش تحلیل محتوای متن مرور گردیده است تا اهداف قابل‌دستیابی و کارایی الگوریتم‌ها در دستیابی به اهداف نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

## پیشینه پژوهش

اکثر مطالعات صورت پذیرفته در مورد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در این حوزه، به‌گونه‌ای می‌باشند که کاربرد یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی را در طراحی یک پروژه‌ی خاص بیان می‌کنند، تحقیقات محدودی نیز در هماهنگی با موضوع این تحقیق به انجام رسیده است: در سال ۲۰۱۴، ماکاریس<sup>۳</sup> و همکاران در «مروری بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در طراحی ساختمان»<sup>۴</sup> موضوع غالب تحقیقات سال‌های

۲۰۱۲-۱۹۹۵ را کنترل ساختمان و سازه معرفی کرده (Machairas et al., 2014) و اسدی و جیم<sup>۵</sup> در «طراحی ساختمان پایدار: مروری بر روش‌های فرااکتشافی اخیر»<sup>۶</sup> کاربرد الگوریتم‌های فرااکتشافی را در طراحی و کنترل ساختمان پایدار مرور می‌کنند (Asadi & Geem, 2015).

اکیچی<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی با عنوان «مروری بر استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی و تکاملی در معماری محاسباتی عملکردی»<sup>۸</sup> پس از بررسی تحقیقات به ارائه‌ی اطلاعات آماری مختلف از جمله نوع الگوریتم‌ها و تقسیم‌بندی رویکردها در حوزه‌های پایداری، هزینه، عملکرد و سازه می‌پردازند و بیان می‌کنند که تمرکز بیشتر تحقیقات در حوزه‌ی پایداری است (Ekici et al., 2018).

این تحقیق ضمن جامعیت بخشیدن به تحقیقات بالا در اهداف و متغیرهای طراحی، به بررسی حوزه تخصص محققین و کاربری پروژه‌های بهینه‌سازی شده، می‌پردازد. همچنین موضوعات مذکور را علاوه بر پایگاه‌های معتبر بین‌المللی در پایگاه‌های معتبر داخلی نیز مرور می‌نماید.

## مبانی نظری پژوهش

### الگوریتم‌های بهینه‌سازی

روش‌های بهینه‌سازی در سه دسته‌ی معین<sup>۹</sup>، اکتشافی<sup>۱۰</sup> و فرااکتشافی<sup>۱۱</sup> به افراد در یافتن پاسخ‌های بهینه یا نزدیک به بهینه کمک می‌کنند. **الگوریتم معین:** در این الگوریتم، پیشرفت بدون تصادف و احتمال بوده و الگوریتم از یک مقدار شروع و به مقدار مشخصی می‌رسد (Yang & Karamanoglu, 2013, 6). و با پیچیده شدن رابطه‌ی معیارها و تابع هدف، حل مسئله نیز سخت می‌گردد (Datta et al., 2019, 3).

**الگوریتم اکتشافی:** اکتشافی، به معنای «آزمایش و خطا» (Yang & Karamanoglu, 2013, 6) برای یافتن پاسخ مسئله است، اما پیچیدگی از یافتن راه‌حل بهینه جلوگیری می‌کند. این بهینه‌سازها راه‌حل‌ها را با حداقل زمان و ذخیره‌سازی تولید کرده (Zanakis & Evans, 1981) و به دلیل وابستگی به ماهیت مسئله (Datta et al., 2019, 3) برای راه‌حل‌های نزدیک به بهینه طراحی شده‌اند. (Hansen et al., 2010)

**الگوریتم فرااکتشافی (فراشناختی - فراابتکاری):** واژه «فرااکتشافی» توسط گلوور<sup>۱۲</sup> در ۱۹۸۶ ابداع شد (Yang & Karamanoglu, 2013, 6). این الگوریتم‌ها بدون وابستگی به ساختار مسئله، با ترکیب اکتشاف و تابع هدف (Datta et al., 2019, 3)، راهنمایی و اصلاح راه‌حل‌های اکتشافی را بر عهده دارند

ژنتیکی، جهش<sup>۲۵</sup> بر روی برخی از اعضا نیز اتفاق می‌افتد (Fasoulaki, 2007).

**الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک<sup>۲۶</sup> (GP):** در این روش الگوریتم ژنتیک پیاده شده بر روی برنامه‌های کامپیوتری، در مسائل خاص با انسان رقابت می‌کند و در ماهواره‌های فضایی، زیست‌شناسی و مدارهای الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Koza, 1997, 469).  
**الگوریتم استراتژی تکاملی<sup>۲۷</sup> (ES):** این الگوریتم در بهینه‌سازی فضاهای جست‌وجوی پیوسته و مبهم کاربرد دارد و یک روش الهام گرفته شده از تکامل است که راه‌حل‌های تصادفی را اغلب از یک توزیع احتمالی چند متغیره انتخاب می‌کند (Hansen et al., 2015, 872).

#### الگوریتم‌های هوش جمعی<sup>۲۸</sup> (SI)

روش‌های هوش جمعی الهام گرفته شده از سیستم‌های زیست‌شناختی، طبیعی و اجتماعی است که در سطوح انتزاع، به‌عنوان فرایند بهینه‌سازی مطرح می‌گردند (Cuevas et al., 2019, 6). آن‌ها به‌عنوان بخشی از محاسبات تکاملی، رفتار سیستم‌های خودسازمان‌یافته (Zhang et al., 2015) و تعاملات اجتماعی جانوران را بررسی می‌کنند؛ مانند بهینه‌سازی انبوه ذرات<sup>۲۹</sup>، کلونی زنبور عسل<sup>۳۰</sup> و کلونی مورچه‌ها<sup>۳۱</sup>.

**الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO):** در سال ۱۹۹۵ دکتر ابره‌ارت<sup>۳۲</sup>، مهندس الکترونیک و دکتر کندی<sup>۳۳</sup>، روان‌شناس علوم اجتماعی، یک روش را که بعداً بهینه‌سازی انبوه ذرات نام گرفت، ابداع کردند. این روش از زندگی طبیعی گله‌ها الهام گرفته شده است (Juneja & Nagar, 2016). برخلاف قانون حفظ نسل برتر، تمام ذرات در فرآیند جست‌وجو حفظ شده و شرایط خود را تحت تأثیر سه عامل تغییر می‌دهند: پایداری، بهترین موقعیت خود و بهترین موقعیت در گروه (Juneja & Nagar, 2016). شکل ۱ مراحل الگوریتم را در مقایسه با الگوریتم ژنتیک معرفی می‌نماید. در مطالعات ژانگ و همکاران<sup>۳۴</sup> با عنوان «بررسی جامع در مورد الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و کاربردهای آن»<sup>۳۵</sup>، تعداد انتشارات آن، بالاتر از دیگر الگوریتم‌های هوش جمعی است (Cichock et al., 2017) و در هشت زمینه‌ی الکترونیک، کنترل خودکار، ارتباطات، تحقیقات عملیاتی، مکانیک، انرژی، پزشکی، شیمی و زیست‌شناسی کاربرد دارد (Zhang et al., 2015).

**بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (ACO):** این روش فرااکتشافی از به‌جای ماندن ماده‌ی فرمون<sup>۳۶</sup> در مسیر مورچه‌ها الهام گرفته شده است. مسیری که پیوسته تغییر می‌کند، باعث ساخت راه‌حل‌های مختلف و انتخاب بهترین راه‌حل می‌گردد (Dorigo & Stützle, 2019, 312).

(Mukherjee & Ray, 2006). این تکنیک‌ها به دلیل توانایی حل مسائل پیچیده، در برنامه‌های واقعی، علوم فیزیکی و اجتماعی پذیرفته شده‌اند (Hansen et al., 2010). سه گروه اصلی فرااکتشافی به‌صورت زیر معرفی می‌گردند. (شکل ۲)

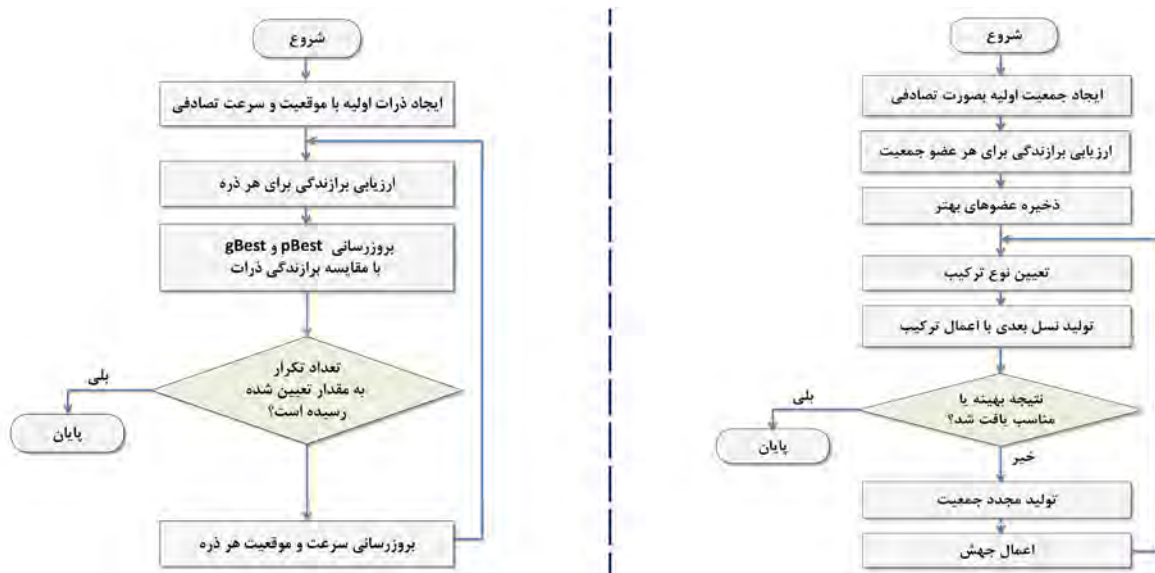
#### الگوریتم‌های محاسبات تکاملی<sup>۳۷</sup> (EC)

روش‌های محاسبات تکاملی یک روش کلی برای حل مسائل بهینه‌سازی است که تابع هدف را بدون استفاده از بینش عمیقتر و با توجه به خواص ریاضی آن، به شیوه‌ی کارآمد مورد استفاده قرار می‌دهند (Cuevas et al., 2019, 8). علاوه بر تاریخچه غنی، افزایش ناگهانی استفاده از آن‌ها در حوزه‌های تحقیقاتی نشان‌دهنده توانایی آنها به‌عنوان ابزار یافتن راه‌حل‌های بهینه در فضاهای جست‌وجوی چندهدفه و پیچیده است (Juneja & Nagar, 2016). برخی از الگوریتم‌های پرکاربرد در این گروه به‌صورت زیر معرفی می‌گردند:

**الگوریتم ژنتیک<sup>۳۸</sup> (GA):** این الگوریتم از اوایل دهه‌ی ۶۰ میلادی توسط فوگل<sup>۳۹</sup> با ارائه‌ی مقاله‌ی «درباره تکامل هوش مصنوعی»<sup>۴۰</sup> (Fogel et al., 1964) و پس‌از آن در ۱۹۷۱ توسط ریچنبرگ<sup>۴۱</sup> با رساله‌ی دکترای «استراتژی تکامل - بهینه‌سازی سیستم‌های فنی با استفاده از اصول تکامل بیولوژیکی»<sup>۴۲</sup> گسترش پیدا کرد (Rechenberg, 1971). در ۱۹۷۵ هالنند<sup>۴۳</sup> به این ایده در کتاب «سازگاری در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی»<sup>۴۴</sup> توسعه بخشید و اولین الگوریتم ژنتیک را ساخت (Sivanandam & Deepa, 2008). این روش در ۱۹۸۶ با انتشار کتاب ساعت‌ساز کور<sup>۴۵</sup> توسط داوکین<sup>۴۶</sup> که شامل برنامه‌ای مبتنی بر روش‌های تکاملی بود، مطرح گشت (Dawkins, 1986, 57).

ژنتیک رایج‌ترین الگوریتم محاسبات تکاملی و مبتنی بر تکامل زیستی و هدایت تصادفی است. این الگوریتم برای فضاهای جست‌وجوی بزرگ با هزینه‌ی بالای یافتن پاسخ که راه‌حل‌های به‌اندازه کافی خوب کفایت می‌کند، کارآمد است (Rodrigues et al., 2013, 4).

الگوریتم‌های ژنتیک تک‌هدفه (SOGA) می‌توانند در مسائل چندهدفه (MOGA) به‌وسیله تجمیع چندین مقدار برازندگی استفاده شوند (Coello Coello, 2002). اگرچه یک تعریف رسمی از الگوریتم‌های ژنتیک وجود ندارد، اما همه آنها از ۴ عنصر تشکیل شده‌اند: اولین آنها جمعیت کروموزوم‌ها (پاسخ‌های احتمالی برای مسئله) و پس‌از آن انتخاب<sup>۴۷</sup> بر اساس یک تابع برازندگی است و به بخشی از جمعیت اشاره می‌کند که در نسل بعدی تکامل خواهند یافت. عنصر سوم عملگر ترکیب<sup>۴۸</sup> است که به‌وسیله آن اعضای جدید تولید می‌گردند؛ همچنین قبل از اعمال مجدد انتخاب، جهت ایجاد تنوع



شکل ۱. مقایسه مراحل الگوریتم ژنتیک (راست) (Sivanandam & Deepa, 2008) و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (چپ) (Juneja & Nagar, 2016)

دلیل سرعت پایین، تعداد راه‌حل کمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. امروزه با توجه به گستردگی متغیرها، یک گام در به‌کارگیری کامپیوتر فراتر رفته و علاوه بر شبیه‌سازی، از آن به‌عنوان یک روش مولد استفاده می‌گردد. پیشرفت ابزارها در پیوند با هوش مصنوعی منجر به تعامل کامپیوترها با فرایند طراحی شده است، در این روش کامپیوتر فضای جست‌وجو را برای یافتن راه‌حل‌های بهینه بررسی می‌کند و پس از تولید و ارزیابی گزینه‌ها، پاسخ‌های بهینه یا نزدیک به بهینه را ارائه می‌دهد (Caldas & Norford, 2002). برخلاف انسان‌ها، ماشین‌ها توانایی اجرای کار تکراری را بدون خستگی و خطا دارند. آن چیزی که انسان در خلاقیت دارد، در کارهای تکراری نداشته و مستعد خطا است. هدف نه جایگزین کردن نوآوری معمار با بهره‌وری کامپیوتر، بلکه استفاده از آن برای کارهای تکراری و پیچیده است. (Rodrigues et al., 2013, 1)

### سابقه کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در معماری

روش‌های نخستین استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در معماری، در سال ۱۹۶۰ توسط جان فریزر<sup>۳۲</sup> معرفی گردید. نتیجه پژوهش او به ایده طراحی فضای پاسخ‌گو ختم گردید (مردمی و همکاران، ۱۳۹۴). او با معرفی معماری تکاملی در سال ۱۹۹۵ تلاش کرد تا یک مبنای نظری با مقایسه معماری و فرآیند تکامل ارائه کند (Frazer, 1995, 110). پیش‌بینی او از آینده ساخت بناهای ارگانیک بود؛ سیستم‌هایی

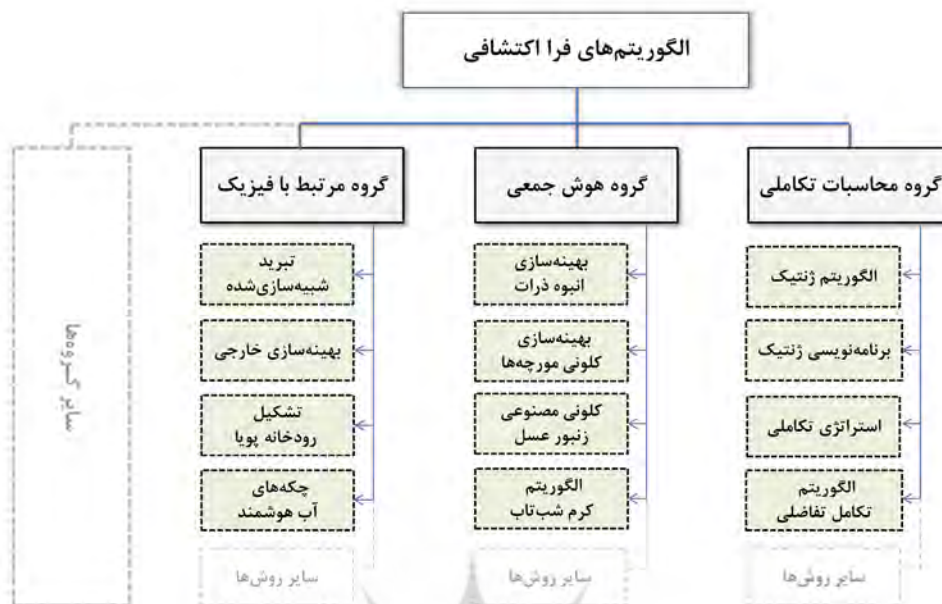
الگوریتم‌های تکاملی<sup>۳۷</sup>: تکنیک‌های موجود در دو گروه الگوریتم‌های محاسبات تکاملی و هوش جمعی، ریشه در مبانی زیست‌شناسی تکاملی دارند و به‌عنوان روش‌های بهینه‌سازی بیولوژیک و یا الگوریتم‌های تکاملی نام‌گذاری می‌شوند (Juneja & Nagar, 2016).

### الگوریتم‌های مرتبط با فیزیک<sup>۳۸</sup>

در روش‌های بهینه‌سازی فیزیکی، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده<sup>۳۹</sup>، متداول‌ترین ابزار و الهام گرفته از مراحل ذوب فلزات است (Datta et al., 2019, 4). بهینه‌سازی خارجی<sup>۴۰</sup>، تشکیل رودخانه پویا<sup>۴۱</sup> و چکه‌های آب هوشمند<sup>۴۲</sup> از دیگر الگوریتم‌های این گروه می‌باشند.

### کاربرد کامپیوتر در معماری

نرم‌افزارهای کمک طراحی از زمان ظهور کامپیوتر در محیط‌های آکادمیک (۱۹۵۰) و به‌طور خاص، از زمان معرفی کامپیوترهای شخصی (۱۹۸۰)، تأثیر زیادی بر طراحی داشته‌اند. اگرچه محققان تعاملی گسترده بین کامپیوتر و طراحان پیش‌بینی می‌کردند، اما ابتدا، کامپیوترها به‌عنوان ابزار نقشه‌کشی و رندر، صرفاً محتوا را سریع‌تر از روش سنتی تولید می‌کردند و در روند طراحی تغییری ایجاد نمی‌کردند (Nagy et al., 2017). در دهه‌های اخیر، شبیه‌سازی کامپیوتری، به‌جای روش‌های سنتی راه‌حل‌های طراح را ارزیابی می‌کند؛ اما به



شکل ۲. انواع اصلی الگوریتم‌های فرا اکتشافی (Asadi & Geem, 2015)

با آن ارتباط برقرار کند، امری مهم در به دست آوردن نتایج بهینه است، اما مسائل معماری اغلب با عوامل زیبایی‌شناسی و اجتماعی ترکیب شده و نمی‌توانند به‌طور کامل با مدل‌های ریاضیاتی بیان گردند (Li, 2012). نیز توک و پاول<sup>۴۵</sup> بیان می‌کنند که راه‌حل‌های پیاده‌سازی تحقیقات، اغلب فاقد رابط بصری و از نظر کاربری محدود می‌باشند. با وجود این که نرم‌افزارها و افزونه‌های رایج دارای الگوریتم‌های پایه می‌باشند، ولی امکان تغییر آن‌ها مگر با برنامه‌نویسی برقرار نمی‌باشد (Nisztuk & Paweł, 2018). این امر باعث کاربرد الگوریتم‌های شناخته‌شده‌تر و محدودیت در توسعه آنها یا استفاده از الگوریتم‌های جدید می‌گردد.

### سؤالات و روش پژوهش

جهت بررسی میزان کارایی روش‌های بهینه‌سازی تکاملی در دستیابی به اهداف معماری و ساخت، سؤالات فرعی زیر مطرح گردیدند:

- الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت تحقق کدام‌یک از اهداف معماری و ساخت کاربرد بیشتری دارند؟
- کدام‌یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در پاسخ‌گویی به اهداف این حوزه کاربردی‌تر می‌باشند؟
- چه کاربری‌هایی از ساختمان قابلیت بیشتری در استفاده از روش‌های بهینه‌سازی دارند؟
- با توجه به ماهیت الگوریتم‌های تکاملی، تحقیقات حوزه ساختمان،

پویا که از لحاظ زیست‌محیطی، جامعه‌شناختی و اقتصاد دارای آگاهی و پایداری باشند. در سال ۱۹۹۰ معماران آوانگارد، فناوری‌های زیست‌شناسی تکاملی را همراه با پیچیدگی معماری امروز که توسط روش‌های مرسوم حل نمی‌گردند؛ به تصویر کشیدند (Sakamoto et al., 1999). الگوریتم ژنتیک از سال ۱۹۹۹ به دلیل اجرای ساده و بهبود عملکرد، به‌عنوان یک روش تکاملی، به معماری معرفی شد (Fasoulaki, 2007). سپس در بهینه‌سازی پلان (Michalek & Papalambros, 2002)، سایت پلان (Finucane et al., 2006)، نما (Caldas & Papapavlou & Turner, 1999) (Norford, 1999)، سازه‌ی ساختمانی (Papapavlou & Turner, 2009) و چند طرح مفهومی (Soddu, 2005) استفاده گردید (Li, 2012).

### محدودیت‌های کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در معماری

مسائل معماری طبق اصول می‌شالویچ و فوگل<sup>۴۴</sup> به‌عنوان مسائل دشوار طبقه‌بندی می‌گردند (Cichock et al., 2017). زیرا برخلاف سایر علوم مهندسی، در معماری حل مسئله یعنی طراحی را به علت تعدد پارامترها و نبود معیار سنجش واقعی، نمی‌توان به‌طور کامل به الگوریتم سپرد و می‌توان از آن به‌عنوان کمک طراح استفاده کرد تا بهینه‌سازی‌های موضعی را انجام دهد (گلابچی و همکاران، ۱۳۹۰، ۱۲۵). راه‌های تبدیل مسائل به مدل‌های ریاضی که الگوریتم بتواند

۷۷ تحقیق منتخب حداقل یکی از الگوریتم‌های محاسبات تکاملی، هوش جمعی یا مرتبط با فیزیک به کار گرفته شده‌اند؛ زیرا با توجه به محدودیت روش‌های معین و اکتشافی، گروه فرااکتشافی از توانایی بالاتری در مسائل پیچیده چون معماری برخوردار است. این تحقیقات به یک طرح ختم شده و شامل مقالات مروری، مقایسه‌ای یا معرفی نمی‌گردند. پس از مرور پیشینه و ادبیات موضوع، بررسی یافته‌های تحقیقات منتخب، جهت پاسخ به سؤالات به شیوه‌ی تحلیل محتوای متن انجام گردید.

### یافته‌های پژوهش

در ۷۷ تحقیق موردمطالعه، اطلاعات در ۴ بخش تحلیل گردیده‌اند. جدول ۱ انتشارات و خلاصه‌ی بررسی را به ترتیب تاریخ نشان می‌دهد.

توسط متخصصین کدام رشته‌ها انجام و پشتیبانی شده‌اند؟ با توجه به گسترده شدن و پیشرفت کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در صنایع مختلف، انتشارات بی‌شماری در این زمینه موجود است. از این رو جهت یافتن انتشارات مرتبط، در طول جست‌وجو، پایگاه‌های داده‌ی Science Direct, Scopus, IEEExplore, Research Gate و Springer Link به‌عنوان پایگاه‌های داده‌ی معتبر در تحقیقات انگلیسی‌زبان و پایگاه‌های اطلاعات علمی ایران (IranDoc) و مرکز علمی جهاد دانشگاهی (SID) در حوزه‌ی انتشارات داخلی، همراه با کلیدواژه‌هایی مانند بهینه‌سازی، طراحی ساختمان، معماری، الگوریتم‌های تکاملی، محاسبات تکاملی، الگوریتم ژنتیک، هوش جمعی، بهینه‌سازی انبوه ذرات و الگوریتم‌های مرتبط با فیزیک، مورد استفاده قرار گرفتند. تاریخ انتشار ۱۶۸ اثر یافت‌شده از ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ متغیر بود که در

جدول ۱. ارائه داده‌های تحقیقات پیشین حوزه‌ی بهینه‌سازی معماری و ساخت.

اطلاعات انتشار			اهداف بهینه‌سازی				روش بهینه‌سازی						
نویسندگان	تخصص نویسندگان	سال	نوعه و دستوری شهری	مدیریت ساخت	سازه ساختمان	فرم ساختمان	نظام فضایی	انرژی نام-ام	محاسبات تکاملی	هوش جمعی	مرتبط با فیزیک	سایر روش‌ها	کاربری
Schnier & Gero	CS/AC	1996					۵-۷		GA				-
Rosenman	AC	1997					۷		GA				-
Gero & Kazakov	CS/AC	1997					۵-۶-۷		GA				-
Jagielski & Gero	CS/AC	1997					۵-۶-۷		GP				-
Jo & Gero	CS/AC	1998					۵-۶-۷		GA				-
Bentley	CS	1998					۵-۶-۸		GA				-
Hegazy	CS	1999		۱-۲-۳-۴					GA				-
Elezkurtaj & Franck	AC	1999					۷-۸-۱۰		GA				-
Jackson	CS	2001				۱			GP			L-S	-
Michalek & Papalambros	MC	2002					۵-۷-۸-۱۰		GA		SA	SQP	مسکونی
Caldas & Norford	MC/AC	2002						۸-۹	GA				-
Virirakis	AC	2003					۷-۸-۱۰-۱۱	۹	GP				-
Khajehpour & Grierson	MC/CV	2003		۲-۵-۶		۳			GA	PSO			اداری
Wetter & Wright	MC/CV	2004					۴	۱-۷-۸-۹	GA				اداری

ادامه جدول ۱. ارائه داده‌های تحقیقات پیشین حوزه‌ی بهینه‌سازی معماری و ساخت.

اطلاعات انتشار			اهداف بهینه‌سازی				روش بهینه‌سازی						
نویسنده‌گان	تخصص نویسنده‌گان	سال	نوع و دسترس‌پذیری	مدیریت ساخت	سازه ساختمان	فرم ساختمان	نظام فضایی	انرژی‌نا-پام	ملاحظات تکاملی	هوش جمعی	مرتبط با فیزیکی	سایر روش‌ها	کاربری
Bausys & Pankrašovaite	MC/CV	2005					۷-۸		GA				-
.Makris et al	CS	2006					۵-۷		GA				-
.Wang et al	CV	2006					۵	۱-۷	GA				اداری
Homayouni	AC	2007					۷-۸		GA				مسکونی
Doulgerakis	AC	2007					۵-۶- ۷-۸- ۱۰		GA				-
.Banerjee et al	CS	2008					۵-۷-۸		GA				-
Serag et al.	CS	2008				۱			GA				کتابخانه
Inoue & Takagi	CS	2008					۵-۷-۸		GA			VD	-
Marin et al.	AC	2008				۱-۶		۳-۶	GA				-
Wong & Chan	CS	2009					۸		GA				-
Thakur et al.	CS	2010					۷-۸- ۱۰		GA			DA	-
Knecht & Koenig	CS	2010					۵-۷-۸		GA			K-DT	-
Flack	CS	2011					۵-۶- ۷-۸- ۱۰		GA				-
									GP				-
Poblete & de la	CV	2011					۵-۷		GA			VD	-
& Rapone Saro	MC	2012						۱-۲-۷		PSO			اداری
Li	AC	2012			۴	۱			GA				موزه
Chiu et al.	EC	2012	۶-۷				۸-۹		GA	PSO			-
Özer & Şener	AC/CS	2013	۱-۶						GA				-
Rodrigues et al.	MC	2013					۵-۷- ۱۰	۸-۹	ES			SHC	-
Talbourdet et al.	MC	2013						۱-۷-۸	NSGA-II				اداری
Rafiq & Rustel	CV	2013		۷					IVC				اداری
									GA				-
Shih-Hsin & Gerber	AC	2014				۱		۱	GA				چندعملکرده
Gerber & Lin	AC	2014				۱		۱-۶	GA				چندعملکرده
Yi	AC	2014				۱		۱-۶	GA				اداری
Karatas & El-Rayes	CV	2014	۸					۴-۵-۶-۹	GA				مسکونی

ادامه جدول ۱. ارائه داده‌های تحقیقات پیشین حوزه‌ی بهینه‌سازی معماری و ساخت.

اطلاعات انتشار			اهداف بهینه‌سازی					روش بهینه‌سازی					
نویسندگان	تخصص نویسندگان	سال	نوع و دسترس پذیری	مدیریت ساخت	سازه ساختمان	فرم ساختمان	نظام فضایی	انرژی نیا-بام	محاسبات تکاملی	هوش جمعی	مرتبط با فیزیک	سایر روش‌ها	کاربری
Conceição António et al.	MC	2014					۲	۱-۶-۷	GA				-
Su & Yan	AC/CS	2015					۹	۹	GA				پرستاری
Futrell et al.	AC/CS	2015						۱-۴-۶	GA	PSO		PS	آموزشی
Wang & Malkawi	AC	2015				۱-۴-۵	۵-۶	۵	GA				-
Evins	CV	2015		۲				۱-۲-۴	-NSGA II				اداری
Sönmez	AC	2015					۵-۶-۷-۸		GA				کتابخانه
Naboni et al.	AC/EC	2015				۱-۵		۱-۴-۶-۹-۱۱	GA				-
Wright & Alajmi	MC/CV	2016						۱-۴	GA				اداری
Delgarm et al.	MC/EC	2016				۵		۱-۴-۷-۹-۱۱		PSO			-
Yazici	AC	2016	۱-۹						GA				-
Zhang et al.	AC/CS	2016				۱		۱-۴	GA				مسکونی
Kirimtat et al.	AC/CS/MC	2016						۱-۶-۷-۸	GA				-
Cubukcuoglu et al.	AC/MC	2016					۷-۸-۱۰-۱۱		GA				رستوران
Babaei & Sheidaii	CV	2016			۵-۶	۲-۳			GA				-
Papadaki & Chasiakos	CV	2016					۱-۲-۳		GA				-
Nagy et al.	AC/CS	2017					۷-۸-۹	۶-۸	MOGA				اداری
Dhariwal & Banerjee	AC	2017						۱-۴	GA				اداری
Bamdad et al.	AC/MC	2017						۱		ACO			تجاری
Chen & Yang	CV	2017				۵		۱-۵-۶-۸-۹	NSGA-II				مسکونی
Dino & Uçoluk	AC	2017				۱-۵	۵-۶	۱-۶-۸-۹	GA				کتابخانه
Cichock et al.	AC/CS/EC	2017			۱-۲	۲-۴				PSO			سلامتی
Bahremand et al.	CS	2017					۷-۸-۱۰		GA				تئاتر
RazaviAlavi & AbouRizk	CS/CV	2017					۱-۲-۳		GA				صنعتی
Koma et al.	AC	2017	۲-۳-۴-۵						GA				-
Kumar et al.	CS	2017					۵-۷-۸		GA				مسکونی



ادامه جدول ۱. ارائه داده‌های تحقیقات پیشین حوزه‌ی بهینه‌سازی معماری و ساخت.

اطلاعات انتشار		اهداف بهینه‌سازی					روش بهینه‌سازی						
نویسندگان	تضمین نویسندگان	سال	توده و دسترسی شهری	مدیریت ساخت	سازه ساختمان	فرم ساختمان	نظام فضایی	انرژی نام-بام	محاسبات تکاملی	هوش جمعی	مرتبط با فیزیک	سایر روش‌ها	کاربری
Bizjak et al.	CS/EC	2018						۱-۵-۶-۷-۱۱	DE				-
Harkouss et al.	MC/CV	2018						۴-۹-۱۱	NSGA-II				مسکونی
Li et al.	UB/CS	2018	۶-۸							PSO			-
Lee et al.	AC/CV	2018			۷					HS			چندعملکرده
Chen et al.	AC	2018				۱		۱-۴-۵-۶-۷	NSGA-II				اداری
Youssef et al.	AC/CV	2018				۱		۱-۱۰	GA				تجاری
جعفری	AC	۱۳۹۳					۷-۸	۶	GA				مسکونی
مردمی و همکاران	AC	۱۳۹۴			۲-۶	۲-۳-۶			GA				-
حیدری	AC	۱۳۹۴						۱-۴-۶-۷-۸-۹	GA				اداری
امین‌زاده گوه‌رریزی و همکاران	UB	۱۳۹۵	۶-۷-۸						NSGA-II				فرودگاه
لطف خدایی و ابوالبشری	MC	۱۳۹۵			۱-۲-۳-۶					SA			-
اسلیمی و همکاران	MC	۱۳۹۶			۱-۲-۳-۴				GP			nelder_m	-
مهدوی‌نژاد و همکاران	AC	۱۳۹۸						۱-۴-۶-۷-۸-۹	GA				اداری

### تخلیل و بحث

از محاسباتی‌ترین علوم ساختمان، زمینه‌ی مناسبی برای استفاده از روش‌های تکاملی دارد. مدیریت زمان، هزینه، منابع، مصالح و ایمنی از اهداف این حوزه می‌باشند. ۳٪ از اهداف نمونه‌ها به این موضوع اختصاص دارد.

**بهینه‌سازی در طراحی سازه ساختمان:** هدف اصلی از بهینه‌سازی سازه، یافتن ساختار هندسی متناسب، برای رفتار یکپارچه، پایدار و در تعامل با معماری است (Hassani et al., 2011). ۷٪ از اهداف پیگیری‌شده در نمونه‌ها، در ارتباط با طراحی سازه و مسائل مربوط به آن است.

**بهینه‌سازی انرژی:** تحلیل‌های محیطی دارای زمینه‌ی مناسبی برای طراحی هدف‌گرا می‌باشند، زیرا با امکان تشخیص معیارهای عددی مانند نور، دما، گرمایش و سرمایش، امکان بهینه‌سازی اجزای نما و

**اهداف بهینه‌سازی:** در این بررسی، علاوه بر تعیین اهداف بهینه‌سازی، متغیرهای طراحی نیز به تفکیک هر هدف استخراج گردیدند. اهداف و متغیرها در ۶ دسته طبقه‌بندی و مطابق جدول ۲ کدگذاری گردیدند. شکل ۳ فراوانی هر دسته از اهداف را در تحقیقات ارائه می‌دهد.

**بهینه‌سازی توده‌فضاها و دسترسی‌های شهری:** روش‌های بهینه‌سازی در این حوزه از مباحثی چون جانمایی، دسترسی، چیدمان و ارتفاع توده‌فضاها آغاز گشته و به حوزه‌های پرسپکتیو، بافت‌ها و فاصله‌ی فضاها گسترش یافته است. ۷٪ از اهداف تحقیقات با این زمینه مرتبط است.

**بهینه‌سازی در مدیریت ساخت و هزینه:** این حوزه به‌عنوان یکی

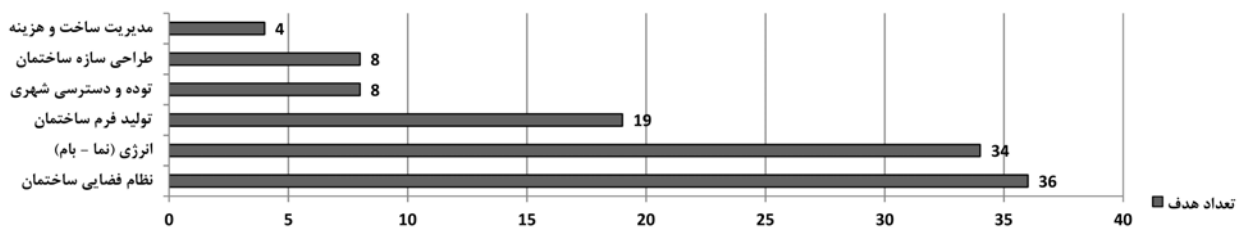
جدول ۲. اهداف و متغیرهای طراحی در تحقیقات بهینه‌سازی حوزه‌ی معماری و ساخت.

هدف	توده و دسترسی شهری	مدیریت ساخت و هزینه	سازه ساختمان	تولید فرم ساختمان	نظام فضایی ساختمان	انرژی (نما-بام)
۱	چیدمان بافت	۱ مدیریت زمان	۱ کاهش وزن سازه	۱ فرم کلی	۱ مرزهای سایت پلان	۱ مصرف انرژی
۲	پرسپکتیو شهری	۲ مدیریت هزینه	۲ توزیع نیروها	۲ فرم سقف	۲ مکان‌یابی توده و فضاها	۲ تولید کربن
۳	موقعیت دیوارها	۳ مدیریت منابع	۳ مقاومت فروپاشی	۳ فرم سازه	۳ فاصله اجزای سایت	۳ عوامل محیطی
۴	ارتفاع بافت شهری	۴ سطح‌بندی منابع	۴ پوسته خرابایی	۴ ارتفاع	۴ جهت‌گیری ساختمان	۴ سرمایه‌ش و گرمایش
۵	پوشش ساختمان‌ها	۵ مصالح	۵ گنبد فضاکار	۵ جهت‌گیری	۵ مرز ساختمان	۵ تهویه طبیعی
۶	فاصله ساختمان‌ها	۶ ایمنی	۶ بار وارد بر سازه	۶ سطح پوششی	۶ سطح‌بندی طبقات	۶ نور روز
۷	مجاورت ساختمان‌ها	۷ BIM	۷ قالب‌بندی فونداسیون	۷	۷ ابعاد و شکل فضاها	۷ سایه‌اندازی
۸	مکان‌یابی در بافت			۸	۸ مجاورت فضاها	۸ جهت‌گیری بازشو
۹	فضای سبز شهری			۹	۹ فاصله فضاها	۹ ابعاد پنجره
				۱۰	۱۰ درهای داخلی و خارجی	۱۰ پنل خورشیدی
				۱۱	۱۱ چیدمان مبلمان	۱۱ ویژگی مصالح

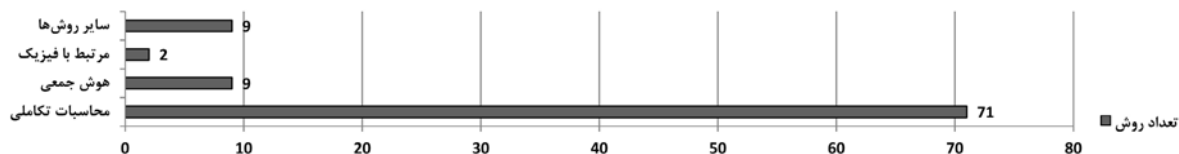
متغیرهای طراحی

بهینه‌سازی نظام فضایی: سامان‌دهی فضاها به معنای روابط و هم‌جواری آن‌ها، جهت پاسخ‌گویی به عملکردها است؛ به‌گونه‌ای که در بهترین حالت نسبت به انواع سامان‌دهی قرار گیرد (Caldas & Norford, 2002). گاهی محدودیت هندسی به معنی شکل و تناسبات نیز به الگوریتم اعمال می‌گردد. الگوریتم‌ها در طراحی طبقات تا موقعیت اجزایی مانند در پنجره و مبلمان کاربرد دارند. ۳۴٪ از اهداف نمونه‌ها، به طراحی نظام فضایی اختصاص دارد طوری که بیشترین کاربرد در تحقیقات معماری و پروژه‌های اجرایی متعلق به این هدف است. از معدود پروژه‌های در دست بهره‌برداری دفتر اداری

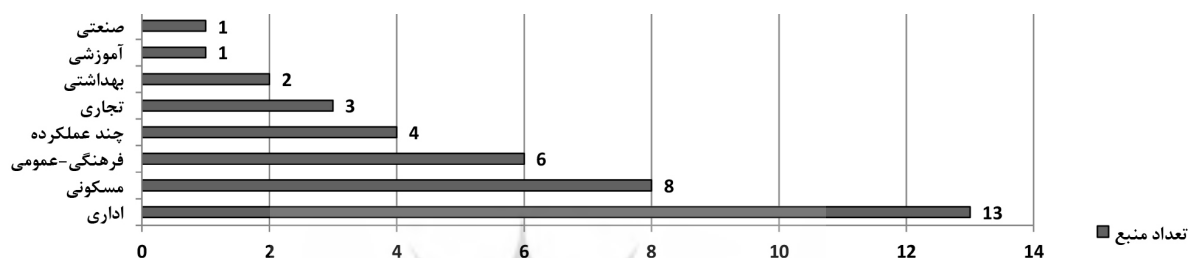
بام، طوری که در بهترین جایگذاری و تناسبات قرار گیرند، میسر است (Caldas & Norford, 2002). ۳۱٪ از اهداف تحقیقات به این حوزه اختصاص یافته که مؤید کارایی الگوریتم‌ها در مبحث پایداری است. بهینه‌سازی فرم ساختمان: جست‌وجوی فرم بهینه با معیارهای متعدد، از اهداف موردتوجه در ۱۷٪ از نمونه‌ها می‌باشد. بهینه‌سازی فرم نیازمند به چرخه‌های تولید و ارزیابی متعدد است تا پس از تولید جمعیت و ارتقاء کیفیت، به گزینه‌ی مطلوب دست یابد (خبازی، ۱۳۹۱، ۱۰۰).



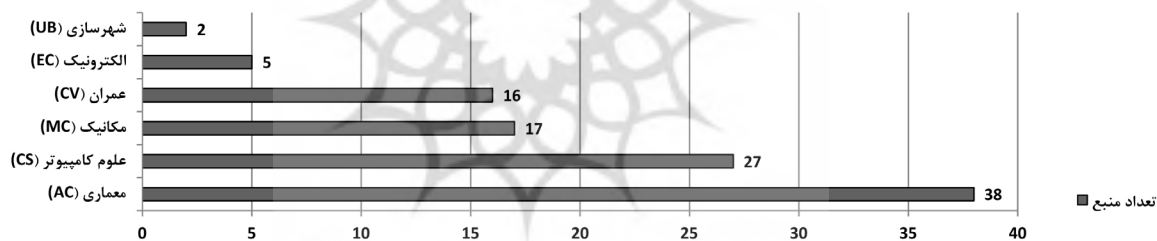
شکل ۳. فراوانی اهداف در تحقیقات بهینه‌سازی حوزه معماری.



شکل ۴. فراوانی نوع الگوریتم در تحقیقات بهینه‌سازی حوزه معماری.



شکل ۵. فراوانی کاربری بنا در تحقیقات بهینه‌سازی حوزه معماری و ساخت.



شکل ۶. فراوانی تخصص محققین در تحقیقات بهینه‌سازی ساختمان.

تکاملی و برنامه‌نویسی ژنتیک، استراتژی تکاملی و تکامل تفاضلی (DE)، به صورت مفرد یا ترکیبی، استفاده شده‌اند. در روش‌های هوش جمعی، بهینه‌سازی انبوه ذرات به عنوان نماینده و کلونی مورچه‌ها و جست‌وجوی هارمونی (HS)، مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش‌های مرتبط با فیزیک با تبرید شبیه‌سازی شده، مورد توجه قرار گرفته‌اند. برخی آثار در این سه دسته گنجانیده نمی‌شود و برخی از دو گروه الگوریتم استفاده نموده‌اند.

در بیشتر تحقیقات الگوریتم‌های محاسبات تکاملی توسط محققین مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۴) و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و انبوه ذرات به الگوریتم‌های کارآمد در حل مسائل بهینه‌سازی تبدیل شده‌اند (Juneja & Nagar, 2016) که دلیل آن احتمالاً هم‌گرایی سریع و بیرون آمدن سریع الگوریتم بهینه‌سازی انبوه

Living در تورنتو<sup>۴۶</sup> متعلق به Autodesk است که مراحل پژوهش آن در مقاله «جست‌وجوی طرح: کاربرد طراحی زایا در برنامه‌ریزی فضای معماری» در سال ۲۰۱۷ توسط نگلی<sup>۴۷</sup> و همکاران ارائه گردیده است (Nagy et al., 2017).

**تعداد اهداف بهینه‌سازی:** متغیرهای طراحی با توجه به اهداف آن متفاوت می‌باشند. تعداد متغیرها با افزودن اهداف گسترش پیدا کرده و در هیچ روشی، همه‌ی متغیرها مورد بهینه‌سازی قرار نمی‌گیرند (Rodrigues et al., 2013, 4). ۶۲٪ تحقیقات یک هدف، ۳۴٪ دو هدف و ۴٪ از آن‌ها سه هدف را به طور هم‌زمان بهینه‌سازی می‌کنند که نمایانگر دشواری ترکیب اهداف گوناگون هنگام بهینه‌سازی است. **نوع الگوریتم بهینه‌سازی:** بررسی‌ها نشان داد روش‌های محاسبات تکاملی، انواع الگوریتم ژنتیک به عنوان پایه‌ای‌ترین الگوریتم

بهینه‌سازی انبوه ذرات نیز رایج‌ترین الگوریتم این تحقیقات در بین مسائل مبتنی بر هوش جمعی است. از بین کاربری‌ها، بیشترین کاربرد، مرتبط با ساختمان‌های اداری به‌ویژه با موضوع بهینه‌سازی انرژی و پس‌از آن در ساختمان‌های مسکونی، اغلب با هدف بهینه‌سازی نظام فضایی است.

لزوم برخورداری از دانش کامپیوتر به دلیل ماهیت پیاده‌سازی الگوریتم‌ها موجب شده تا بخش زیادی از تحقیقات این حوزه، با مشارکت متخصصین علوم کامپیوتر در کنار محققان دیگر به‌صورت میان‌رشته‌ای انجام گردد. بررسی مطالعات نشان می‌دهد ورود الگوریتم‌ها در معماری عمدتاً به حیطة پژوهش‌های نظری محدود گشته است. از این رو جهت عملیاتی شدن کاربرد الگوریتم‌ها در حوزه اجرایی، طراحان نیازمند همکاری بیشتر با متخصصین دیگر حوزه‌ها می‌باشند. مسائل بهینه‌سازی تکاملی در حوزه‌ی معماری و ساختمان علی‌رغم پیشرفت زیاد در ۲۳ سال گذشته، هنوز به‌طور کامل مورد اکتشاف قرار نگرفته‌اند. با اینکه محاسبات تکاملی در سال‌های اخیر تأثیر چشم‌گیری بر توسعه‌ی مسائل حوزه‌ی معماری و ساخت داشته است، اما جهت بهینه‌سازی زمان پردازش و افزایش تعداد متغیرها، به بهبود روش‌های قدیمی و الگوریتم‌های جدیدتر همچون گروه هوش جمعی نیاز است؛ تا امکان استفاده از قابلیت آن‌ها به‌عنوان روش‌های کاربردی در این حوزه فراهم گردد.

ذرات از بهینه‌های محلی (Chen et al., 2018) و سابقه بیشتر الگوریتم ژنتیک است.

**کاربری نمونه‌های بهینه‌سازی شده:** آثار مختلف از جهت توجه به کاربری بنا به دو دسته تقسیم می‌شوند. ۳۹ تحقیق، فارغ از کاربری به پیاده‌سازی الگوریتم می‌پردازند و در ۳۸ نمونه، کاربری، مورد توجه است. مطابق شکل ۵، در نمونه‌هایی که نوع کاربری بنا مشخص گردیده است، عمده‌ی کاربری‌ها اداری و سپس مسکونی، به ترتیب با هدف غالب بهینه‌سازی مصرف انرژی و نظام فضایی می‌باشند.

**زمینه فعالیت محققین:** مطابق شکل ۶، تخصص محققین شامل حوزه‌های معماری، عمران، شهرسازی، علوم کامپیوتر، مکانیک و الکترونیک میگردد. در این بین از ۷۷ تحقیق، محققین حوزه معماری در ۳۸ تحقیق حضور داشته‌اند که ۱۸ تحقیق بدون همکاری و ۲۰ تحقیق با همکاری محققین دیگر رشته‌ها انجام گرفته است. پس‌از آن حضور رشته‌های علوم کامپیوتر با ۲۷ تحقیق، قابل توجه است.

حدود ۳۴٪ از تحقیقات، به‌صورت میان‌رشته‌ای، با همکاری محققین دو یا سه حوزه صورت گرفته است. در ۶۲٪ این موارد، متخصصین حوزه‌ی معماری و در نیمی متخصصین کامپیوتر شرکت داشته‌اند که بیان‌گر نقش مهم همکاری با این محققین در پیاده‌سازی الگوریتم‌ها است.

## نتیجه‌گیری

الگوریتم‌های بهینه‌سازی با گذشت زمان بیش‌از پیش در علوم مختلف از جمله معماری مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحلیل آثار نشان می‌دهد که هم‌زمان با افزوده‌شدن روش‌های متنوع بهینه‌سازی فرااکتشافی، این الگوریتم‌ها با شش هدف عمده‌ی طراحی توده‌های ساختمانی و دسترسی‌های شهری، مدیریت ساخت و هزینه، طراحی سازه ساختمان، مباحث انرژی، تولید فرم ساختمان و نظام فضایی پیاده‌سازی گردیده‌اند. هرچند اغلب تحقیقات به‌صورت تک‌هدفه طرح‌ریزی شده‌اند، اما برخی تحقیقات نیز به پاسخ‌گویی به چند هدف در مسئله پرداخته‌اند.

از ابتدای توسعه محاسبات تکاملی، بهینه‌سازی نظام فضایی به‌عنوان یکی از مسائل بنیادی در طراحی کاربری‌ها، زمینه‌ی گسترده‌ای از اهداف تحقیقات را تشکیل می‌دهد. پس‌از آن، از اوایل قرن ۲۱ و رشد روزافزون صنایع و اهمیت حفظ محیط‌زیست، مسائل مربوط به پایداری، علی‌رغم قدمت کمتر، به یکی از پرکاربردترین حوزه‌ها برای کاربرد این الگوریتم‌ها در ساختمان تبدیل شده‌اند. در تحقیقات این حوزه، الگوریتم ژنتیک، به دلیل سابقه‌ی بیشتر، پرکاربردترین الگوریتم در بین روش‌های تکاملی در پاسخ‌گویی به اهداف و الگوریتم

## پی‌نوشت‌ها

1. Evolution
2. The origin of species by means of natural selection: or the preservation of favored races in the struggle for life
3. Vasileios Machairas
4. Algorithms for optimization of building design: A review.
5. Somayeh Asadi and Zong Woo Geem
6. Sustainable Building Design: A Review on Recent Metaheuristic Methods.
7. Berk Ekici
8. Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review
9. Deterministic
10. Heuristic
11. Metaheuristic
12. Fred W Glover
13. Evolutionary Computation Algorithms

47. Project Discover: An application of generative design for architectural space planning, Danil Nagy

### فهرست مراجع

۱. اسلیمی، هیراد؛ جمالی، علی؛ و نریمان زاده، نادر. (۱۳۹۶). بهینه‌سازی اندازه و توپولوژی سازه‌های خرپایی فضاکار با استفاده از الگوریتم ترکیبی برنامه‌ریزی ژنتیکی و نلدر-مید. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، ۴۰-۳۲-۶.
۲. امین‌زاده گوهرریزی، بهرام؛ توحیدی راد، سعید؛ و اسدی، روشنک. (۱۳۹۵). به‌کارگیری الگوریتم NSGA-II برای حل مسائل مکان‌یابی چندهدفه. *فصل‌نامه مطالعات شهری*، ۱۹، ۲۶-۱۵.
۳. جعفری، فاطمه. (۱۳۹۳). کاربرد الگوریتم ژنتیک در حل مسئله طراحی معماری؛ (نمونه: طراحی مجتمع مسکونی باران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۴. حیدری، مهدیه. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی فرم ساختمان‌های اداری بر اساس الگوریتم‌های تکاملی در جهت توسعه پایدار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز.
۵. خبازی، زوبین. (۱۳۹۱). *پارادایم معماری الگوریتمیک*. مشهد: انتشارات کتابکده کسری.
۶. گلابچی، محمود؛ اندجی گرمارودی، علی؛ و باستانی، حسین. (۱۳۹۰). *معماری دیجیتال: کاربرد فناوری‌های CAD/CAM/CAE در معماری*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
۷. لطف‌خدایی، بهزاد؛ و ابوالبشری، محمدحسین. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی طرح سازه‌های پیوسته دوبعدی با استفاده از روش الگوریتم تبرید تدریجی کارآمد. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها*، ۶ (۴)، ۴۸-۴۱.
۸. مردمی، کریم؛ سهیلی فرد، مهدی؛ و آقا عزیزی، مجید. (۱۳۹۴). همسازی سازه و معماری در راستای جانمایی بهینه تکیه‌گاه‌ها به روش الگوریتم ژنتیک (نمونه موردی: پوشانه‌های با فرم آزاد، طراحی شده بر اساس هندسه گره ایرانی). *فصلنامه علمی- پژوهشی نقش جهان*، ۵ (۲)، ۷۵-۶۵.
۹. مهدوی نژاد، محمدجواد؛ ارباب، مژگان؛ و ارباب، مریم. (۱۳۹۸). استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی چند هدفه لوورهای خارجی در ساختمان‌های اداری. *دوفصلنامه اندیشه معماری*، ۵، ۲۳۵-۲۱۴.
10. Asadi, S., & Geem, Z. W. (2015). Sustainable building design: A review on recent metaheuristic methods. *Studies in computational intelligence*, 585, 203-223.
11. Babaei, M., & Sheidaii, M. R. (2016). Desirability-based design of space structures using genetic algorithm and fuzzy logic. *Civil engineering*, 15(2), 231-245.
12. Bahremand, A., Batard, T., Marques, R., Evans, A., &

14. Genetic Algorithm
15. Lawrence Jerome Fogel
16. On the Evolution of Artificial Intelligence
17. Ingo Rechenberg
18. Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution
19. John Holland
20. Adaptation in natural and artificial systems
21. The Blind Watchmaker
22. Richard Dawkins
23. Selection
24. Crossover
25. Mutation
26. Genetic Programming
27. Evolution Strategies
28. Swarm Intelligence Algorithms
29. Particle Swarm Optimization
30. Artificial Bee Colony
31. Ant Colony Optimization
32. Russel.C. Eberhart
33. James Kennedy
34. Yudong Zhang, Shuihua Wang and Genlin Ji
35. A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications
36. Pheromone
37. Evolutionary Algorithms
38. Physics related Algorithms
39. Simulated annealing
40. External Optimization
41. River Formation Dynamic
42. Intelligent Water Drops
43. John Frazer
44. Michalewicz and Fogel
45. Maciej Nisztuk and Myszkowski B Pawel
۴۶. Autodesk offices in the MaRS Discovery District: در این پروژه که در سال ۲۰۱۸ به اتمام رسید، شش هدف بر اساس عملکرد و ترجیحات کارکنان با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارزیابی گردید (Nagy et al., 2017).

- Blat, J. (2017). Optimizing layout using spatial quality metrics and user preferences. *Graphical models*, 93, 25–38.
13. Bamdad, K., Cholette, M. E., Guan, L., & Bell, J. (2017). Ant colony algorithm for building energy optimisation problems and comparison with benchmark algorithms. *Energy and buildings*, 154, 404-414.
14. Banerjee, A., Quiroz, J. C., & Louis, S. J. (2008). A model of creative design using collaborative interactive genetic algorithm. *Design computing and cognition*, 8, 397-416.
15. Bausys, R., & Pankrašovaite, I. (2005). Optimization of architectural layout by the improved genetic algorithm. *Civil engineering and management*, 11(1), 13-21.
16. Bentley, P. J. (1998). *The revolution of evolution in design: from coffee tables in Proceeding of recent advances in soft computing*. July 2-3, (pp. 172–182). Leicester.
17. Bizjak, M., Žalik, B., Štumberger, G., & Lukač, N. (2018). Estimation and optimisation of buildings' thermal load using LiDAR data. *Building and environment*, 128, 12-21.
18. Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: overview. *ACM computing surveys*, 35(3), 268–308.
19. Caldas, L., & Norford, L. K. (1999). *A genetic algorithm tool for design optimization*. ACADIA, 99.
20. Caldas, L., & Norford, L. K. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in construction*, 11, 173–184.
21. Chen, K. W., Janssen, P., & Schlueter, A. (2018). Multi-objective optimisation of building form, envelope and cooling system for improved building energy performance. *Automation in construction*, 94, 449-457.
22. Chen, X., & Yang, H. (2017). A multi-stage optimization of passively designed high-rise residential buildings in multiple building operation scenarios. *Applied energy*, 206, 541-557.
23. Chiu, C. C., Cheng, Y. T., & Chang, C. W. (2012). Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for the path loss reduction in an urban area. *Applied science and engineering*, 5(4), 371-380.
24. Cichock, J. M., Migalska, A., Browne, W. N., & Rodriguez, E. (2017). SILVEREYE– the implementation of Particle Swarm Optimization algorithm in a design optimization tool In *Proceeding of 17th International Conference CAAD Futures*. July 12-14, (pp.151–169). Singapore: Springer nature.
25. Coello Coello, C. (2002). Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Computer methods in applied Mechanics and engineering*, 19(11), 1245-1287.
26. Conceição António, C. A., Monteiro, J. B., & Afonso, C. F. (2014). Optimal topology of urban buildings for maximization of annual solar irradiation availability using a genetic algorithm. *Applied Thermal engineering*, 73(1), 424-437.
27. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms*. Cambridge: MIT press.
28. Cubukcuoglu, C., Chatzikonstantinou, I., Ekici, B., & Sariyildiz, S. (2016). Multi-objective optimization through differential evolution for restaurant design In *IEEE congress on evolutionary computation (CEC)*. (pp. 2288 - 2295). July 24-29, Vancouver: IEEE.
29. Cuevas, E., Barocio, E., Emilio, E., & Arturo, C. (2019). *Introduction to metaheuristics methods in metaheuristics algorithms in power systems* (pp. 1 - 8). Basel: Springer.
30. Datta, S., Roy, S., & Davim, J. P. (2019). *Optimization techniques: An overview* In Datta, S., & Davim, J. P. (Eds.), *Optimization in Industry*, (Vol.2, pp. 1 - 11). Basel: Springer.
31. Dawkins, R. (1986). *The blind watchmaker*. New York: Norton & Company.
32. Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., & Delgarm, S. (2016). Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). *Applied Energy*, 170, 293-303.
33. Dhariwal, J., & Banerjee, R. (2017). An approach for building design optimization using design of experiments. *Building Simulation*, 10(3), 323–336.
34. Dino, I. G., & Üçoluk, G. (2017). Multiobjective design optimization of building space layout, energy and daylighting

- performance. *Computing in Civil Engineering*, 31(5), 1-18.
35. Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). Ant colony optimization: overview and recent advances In M. Gendreau, & J. Y. Potvin (Eds.), *Handbook of metaheuristics: International series in operations research and management science*, (Vol.272, pp. 311-351). Basel: Springer.
36. Doulgerakis, A. (2007). *Genetic programming + unfolding embryology in automated layout planning*. Unpublished master's thesis, Bartlett School of Graduate Studies, London.
37. Ekici, B., Cubukcuoglu, C., Turrin, M., & Sariyildiz, I. S. (2018). Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. *Building and environment*, 147, 356-371.
38. Elez Kurtaj, T., & Franck, G. (1999). Genetic algorithms in support of creative. *Architectural computing from Turing to 2000*, 645-651.
39. Evins, R. (2015). Multi-level optimization of building design. energy system sizing and operation. *Energy*, 90, 1775-1789.
40. Fasoulaki, E. (2007). Genetic algorithms in architecture: A necessity or a trend? In *10th generative art international conference*. June 12-15, Milan.
41. Feldmeth, N. (1996). American church history," CH506, lecture "The attack upon orthodoxy. *Fuller theological seminary*, School of theology, California.
42. Finucane, E. L., Derix, C., & Coates, P. S. (2006). Evolving urban structures using computer optimisation techniques In *Generative Art Conference*. December 15-17, (pp. 1 26). Milan: Generative art
43. Flack, R. W. (2011). Evolution of architectural floor plans In *European conference on the applications of evolutionary computation*. April 27-29, (pp. 313-322). Torino: Applications of evolutionary computation.
44. Fogel, L. J., Owens, A., & Walsh, M. (1964). *On the Evolution of Artificial Intelligence In Fifth National Symposium on Human Factors in Electronics*. 5-6 May, (pp. 63-76). San Diego: IEEE.
45. Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. London: Architectural association.
46. Futrell, B. J., Ozelkan, E. C., & Brentrup, D. (2015). Bi-objective optimization of building enclosure design for thermal and lighting performance. *Building and Environment*, 92, 591-602.
47. Futuyama, D. J. (2017). *Evolution*. (4th ed.). Sunderland: Sinauer Associates.
48. Gerber, D. J., & Lin, S.H. E. (2014). Designing in complexity: Simulation, integration, and multidisciplinary design optimization for architecture. *Simulation*, 90(8), 936-959.
49. Gero, J. S., & Kazakov, V. A. (1997). Learning and re-using information in space layout planning problems using genetic engineering. *Artificial Intelligence in Engineering*, 12(3), 163-176.
50. Hall, B. K., Hallgrímsson, B., & Strickberger, M. W. (2008). *Strickberger's evolution: the integration of genes, organisms and populations*. (4th ed.). Sudbury: Jones and Bartlett.
51. 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), 94-105.
52. Hansen, N., Arnold, D. V., & Auger, A. (2015). *Evolution strategies* In J. Kacprzyk, & W. Pedrycz (Eds.), *Springer handbook of computational intelligence* (Vol.44, pp. 871 - 898). Berlin: Springer.
53. Harkouss, F., Fardoun, F., & Henry, P. B. (2018). Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings. *Building Engineering*, 16, 57-71.
54. Hassani, B., Tavakkoli, M., & Moghaddam, N. Z. (2011). Application of isogeometric analysis in structural shape optimization. *Scientia Iranica*, 18(8), 846-852.
55. Hegazy, T. (1999). Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(3), 167-175.
56. Homayouni, H. (2007). *A genetic algorithm approach to*

- space layout planning. Unpublished master's thesis, University of Washington, Seattle.
57. Inoue, M., & Takagi, H. (2008). Layout Algorithm for an EC-based Room In *IEEE Conference on Soft Computing in Industrial Applications*. June 25 - 27, (pp. 165–170). Muroran: IEEE.
58. Jackson, H. (2001). *Toward a symbiotic coevolutionary approach to architecture* In D. Corne, & P. C. Bentley (Ed.), *Creative Evolutionary Systems* (pp. 299–313). Burlington: Morgan Kaufmann.
59. Jagielski, R., & Gero, J. S. (1997). A genetic programming approach to the space. *CAAD futures*, 875, 875–884.
60. Jo, J. H., & Gero, J. (1998). Space layout planning using an evolutionary approach. *Artificial intelligence in engineering*, 12(3), 149-162.
61. Juneja, M., & Nagar, S. (2016). *Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review* In *International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*. October 21-22, (pp. 1-5). Piscataway: IEEE.
62. Karatas, A., & El-Rayes, K. (2014). Optimal trade-offs between social quality of life and life-cycle cost in housing units. *Construction Engineering and Management*, 140(12), 1-9.
63. Khajehpour, S., & Grierson, D. E. (2003). Profitability versus safety of high-rise office buildings. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 25(4), 279–293.
64. Kiritmat, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., Sariyildiz, S., & Suganthan, P. N. (2016). Multi-objective optimization for shading devices in buildings by using evolutionary algorithms In *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. July 24-29, (pp. 3917 – 3924). Vancouver: IEEE.
65. Knecht, K., & Koenig, R. (2010). Generating floor plan layouts with k-d trees and evolutionary algorithms In *GA2010 - 13th Generative Art Conference*. December 15-17, (pp. 238–253). Milan: Domus Argenia Publisher.
66. Koma, S., Yamabe, Y., & Tani, A. (2017). Research on urban landscape design using the interactive genetic algorithm and 3D images. *Visualization in Engineering*, 5(1), 1-10.
67. Koza, J. R. (1997). *Genetic programming* In H. Henderson (Ed.), *Encyclopedia of computer science and technology* (Vol.2, pp. 441–885). New York: Infobase publishing.
68. Kumar, A., Dutta, K., Gupta, A., Badyal, S., & Rohan, D. (2017). Assisting an architect with alternative automated space layout designs using order crossover genetic algorithm in Autocad in *International conference on advances in mechanical industrial, Automation and management systems (AMIAMS)*. February 3-5, IEEE.
69. Lee, D., Lim, H., Kim, T., Cho, H., & Kang, K. I. (2018). Advanced planning model of formwork layout for productivity improvement. *Automation in Construction*, 85, 232–240.
70. Li, L. (2012). The optimization of architectural shape based on genetic algorithm. *Frontiers of architectural research*, 1(4), 392-399.
71. Li, Y., Chen, Y., Zhao, M., & Zha, X. (2018). Optimization of planning layout of urban building based on improved logit and PSO algorithms, *Complexity*, 2018, 1-11.
72. Machairas, V., Tsangrassoulis, A., & Axarli, K. (2014). Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 101-112.
73. Makris, D., Ioannis, H., Georges, M., & Dimitri, P. (2006). Multicad - MOGA: A system for conceptual style design of buildings in *Computer graphics and artificial intelligence conference*. May 23-24, (pp. 73-84).
74. Marin, P., Bignon, J.-C., & Lequay, H. (2008). A genetic algorithm for use in creative design processes. *Halshs. Archives-ouvertes* In *Annual conference of the association for computer aided design in architecture (ACADIA)*. October 31, Minneapolis: halshs.
75. Michalek, J. J., & Papalambros, P. Y. (2002). Interactive design optimization of architectural layouts. *Engineering optimization*, 34(5), 485–501.
76. Mukherjee, I., & Ray, P. K. (2006). A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers*



- & *Industrial Engineering*, 50(1-2), 15–34.
77. Naboni, E., Malcangi, A., Zhang, Y., & Barzon, F. (2015). Defining the energy saving potential of architectural design. *Energy procedia*, 83, 140-146.
78. Nagy, D., Lau, D., Locke, J., Stoddart, J., Villaggi, L., Wang, R., Zhao, D. & Benjamin, D. (2017). Project Discover: An application of generative design for architectural space planning In SIMAUD 17: *Proceedings of the symposium on simulation for architecture and urban design*. May 22-24, (pp 1-8). Toronto: John H. Daniels faculty of architecture.
79. Nisztuk, M., & Paweł, M. B. (2018). Sability of contemporary tools for the computational design of architectural objects: Review, features evaluation and reflection. *Architectural computing*, 16(1), 58 –84.
80. Özer, D. G., & Şener, S. M. (2013). User accessibility optimization using genetic algorithm: ADA. *AZ ITU Journal of the faculty of architecture*, 10(2), 212-230.
81. Papadaki, I. N., & Chassiakos, A. P. (2016). Multi-objective construction site layout planning using genetic algorithms In M.H. Miroslaw, & J. Skibniewski (Eds.), *Creative construction conference 2016*. June 25-28, (Vol.164, pp. 20 – 27). Amsterdam: Elsevier B.V.
82. Papapavlou, A., & Turner, A. (2009). Structural evolution: A genetic algorithm method to generate structurally optimal Delaunay triangulated space frames for dynamic loads in *27th ecaade Conference*. September 14-15, (pp. 173-180). Istanbul: Istanbul technical university.
83. Poblete, B., & de la, C. I. (2011). *Genetic algorithms as a design strategy in architecture*. Unpublished doctoral dissertation, Polytechnic University of Catalonia, Barcelona.
84. Rafiq, Y., & Rustell, M. (2013). Building information modeling steered by evolutionary computing, *Journal of Computing in Civil Engineering*. *Computing in Civil Engineering*, 28(4), 1-11.
85. Rapone, G., & Saro, O. (2012). Optimisation of curtain wall facades for office buildings by means of PSO algorithm. *Energy and Buildings*, 45, 189-196.
86. RazaviAlavi, S., & AbouRizk, S. (2017). Site layout and construction plan optimization using an integrated genetic algorithm simulation framework. *Computing in civil engineering*, 31(4), 1-10.
87. Rechenberg, I. (1971). *Evolutions strategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Unpublished doctoral dissertation, Technical University of Berlin, Berlin.
88. Rodrigues, E., Gaspa, A. R., & Gomes, A. (2013). Evolutionary strategy enhanced with local search technique for the space allocation problem in architecture Part 1: methodology. *Computer-aided design*, 45, 887-897.
89. Rosenman, M.A. (1997). *The generation of form using an evolutionary approach*. In: D. Dasgupta, & Z. Michalewicz (Eds), *Evolutionary algorithms in engineering applications*. (Vol.1, pp 69-85). Berlin: Springer.
90. Shih-Hsin, L., & Gerber, D. J. (2014). Multidisciplinary design optimization and performance boundaries for design decision support. *Energy and Buildings*, 84, 426-441.
91. Sakamoto, Y., Nagaiwa, A., Kobayasi, S., & Shinozaki, T. (1999). An optimization method of district heating and cooling plant operation based on genetic algorithm In *ASHRAE Annual Meeting*, June 19-23, (pp. 104-115). ASHRAE Transactions.
92. Schnier, T., & Gero, J. S. (1996). Learning genetic representations as alternative to hand-coded shape grammars. *Artificial intelligence in design*, 96, 39–57.
93. Serag, A., Ono, S., & Nakay, S. (2008). Using interactive evolutionary computation to generate creative building designs. *Artificial Life and Robotics*, 13(1), 246–250.
94. Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). *Genetic algorithms In Introduction to genetic algorithms* (pp. 15-37). Berlin: Springer.
95. Soddu, C. (2005). Argenia, Artificial DNA and Visionary Variations In SIGraDi 2004. *Proceedings of the 8th Iberoamerican Congress of Digital Graphics*. november 10-12, Porto Alegre: Workshop e Palestras.
96. Sönmez, N. O. (2015). Architectural layout evolution through similarity-based evaluation. *Architectural computing*, 13(3-4), 271 – 279.

97. Su, Z., & Yan, W. (2015). A fast genetic algorithm for solving architectural design optimization problems. *Artificial intelligence for engineering design analysis and manufacturing*, 29(4), 457- 469.
98. Talbourdet, F., Michel, P., Andrieux, F., & Millet, J.-R. (2013). A knowledge-aid approach for designing high-performance buildings. *Building Simulation*, 6(4), 337–350.
99. Thakur, M. K., Kumari, M., & Das, M. (2010). Architectural layout planning using genetic algorithms In *3rd International conference on computer science and information technology*. July 9-11, (Vol.4, pp. 5–11). Beijing: Beijing University of Technology.
100. Virirakis, L. (2003). GENETICA: A computer language that supports general formal expression with evolving data structures. *Transactions on evolutionary computation*, 7(5), 456–481.
101. Wang, B., & Malkawi, A. (2015). Genetic algorithm based building form optimization study for natural ventilation potential in *14th conference of international building performance simulation association*. December 7-9, (pp. 640 – 647). Hyderabad, India.
102. Wang, W., Rivard, H., & Zmeureanu, R. (2006). Floor shape optimization for green building design. *Advanced engineering informatics*, 20(4), 363-378.
103. Wetter, M., & Wright, J. (2004). A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. *Building and environment*, 39(8), 989-999.
104. Wong, S. S., & Chan, K. C. (2009). EvoArch: An evolutionary algorithm for architectural layout design. *Computer-Aided Design*, 41(9), 649-667.
105. Wright, J., & Alajmi, A. (2016). Efficient genetic algorithm sets for optimizing constrained building design problem. *Sustainable built environment*, 5(1), 123-131.
106. Yang, X. S., & Karamanoglu, M. (2013). 1 - *Swarm intelligence and bio-inspired computation: an overview* In X. Yang, Z. Cui, R. Xiao, A. H Gandomi., & M. Karamanoglu (Eds.), *Swarm intelligence and bio-inspired computation-theory and applications* (pp. 3-23). London: Elsevier.
107. Yazici, S. (2016). A parametric landscape urbanism method: The search for an optimal solution, *A/Z ITU Journal of the faculty of architecture*. 13(3), 155-16.
108. Yi, H. (2014). Automated generation of optimised building envelope: simulation based multiobjective process using evolutionary algorithm. *Sustainable building technology and urban development*, 5(3), 159 -170.
109. Youssef, A. M., Zhai, Z., & Reffat, R. M. (2018). Generating proper building envelopes for photovoltaics integration with shape grammar theory. *Energy and buildings*, 158, 326-341.
110. Zanakis, S. H., & Evans, J. R. (1981). Heuristic “Optimization”: Why, When, and How to Use It. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 11(5), 84-91.
111. Zhang, L., Zhang, L., & Wang, Y. (2016). Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm in the severe cold zones of China. *Solar energy*, 132, 38-50.
112. Zhang, X., & Shiu, Y. Y. (2015). A directional mutation operator for differential evolution algorithms. *Applied soft computing*, 30, 529-548.
113. Zhang, Y., Wang, S., & Ji, G. (2015). A Comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications. *Mathematical problems in engineering*, 1-38.

# Investigating the Efficiency of Evolutionary Optimization Methods in Achieving Architectural and Construction Objectives

*Maryam Sadeghian, M. A, Faculty of Architecture and Urbanism, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

*Akram Hosseini\*, Assistant professor, Faculty of Architecture and Urbanism, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

## Abstract

The increasing popularity of the optimization approach in different sciences has led architects to use them to achieve various objectives in designing and constructing buildings. However, the functions, advantages, and limitations for each of these optimization strategies are scarcely known, due to their newness in architecture and construction fields. Optimization algorithms are classified into three categories: deterministic, heuristic, and meta-heuristic algorithms. Meta-heuristic algorithms, are more efficient and categorized into three main groups: evolutionary computing, swarm intelligence, and physics-related algorithms. Most of the studies conducted on optimization algorithms, in this field, are on the application of one of the optimization algorithms in the design of a particular project. Limited research has been done in coordination with the subject of this study, investigating the application of these algorithms in a specific field. After reviewing the history and literature of the subject, to discuss how optimization methods are used in architecture, 77 related articles and theses that used optimization methods have been reviewed through scholar works published since 1996 (the first publications in this field) up to now. Selected research was analyzed using the textual content analysis method to determine "the efficiency of evolutionary optimization methods in achieving architectural and construction objectives" as the main research question; there were also several sub-questions on the way to answer the main question: Which architectural objectives are most achievable by using optimization algorithms? Which types of optimization algorithms are appropriate for architectural objectives? Which building functions have the most potential for using optimization methods? Which researchers conduct and support the research of evolutionary algorithms in building issues?. Optimization algorithms have been undertaken to solve design problems for six different objectives: mass design and urban access, construction and cost management, building's structural design, energy issues, building form generation and space planning. Various design variables have been defined to search for optimal response to each of the objectives. Among these objectives, the highest application of optimization algorithms is related to spatial planning optimization in residential buildings and energy optimization in official ones. The analysis of the publications demonstrates that various methods of meta-heuristic optimization have been used over time to solve architectural problems. Genetic Algorithm is the most widely used one in architectural optimization, and particle swarm optimization is the most common method in swarm intelligence based research. The review of studies indicates the predominantly theoretical attention of architectural scholars to this issue. Given the distance between the research and the implementation phase, architects should work more closely with researchers in other fields, especially those in computer science, to approach the implementation stage. However, the development of each of these areas requires the improvement of previous methods and research into how other algorithms, such as swarm intelligence based ones, can be used to solve design problems in architecture. The development of user-friendly software with a graphical user interface for a better grasp of the design process and results can affect architects' usage of evolutionary algorithms as a design method.

**Keywords:** Optimization, Metaheuristic Methods, Evolutionary Algorithms, Architectural Design Process.

\* Corresponding Author Email: akram.hosseini@um.ac.ir