

## ارائه سیستم پشتیبانی تصمیم نوین به منظور موازنه هزینه - انتشار دی اکسید کربن گسسته در پروژه‌های ساخت: کاربردی از الگوریتم ژنتیک الگوبرداری

محمدعلی بهشتی نیا<sup>۱</sup>، ناهید فرازمنند<sup>۲</sup>

**چکیده:** در وضعیت پرقابلیت امروزی، اگرچه صنعت ساخت‌وساز با فشارهای زیادی برای برآوردن انتظارات مشتریان روبه‌روست، بودجه‌های کمتری در اختیار دارد. حال آنکه در سال‌های اخیر، این صنعت به ایجاد دامنه وسیعی از مشکلات زیست محیطی، از جمله مصرف زیاد منابع جهان و آلوده کردن محیط اطراف متهم شده است. بر اساس آمارهای منتشرشده، صنعت ساخت‌وساز یکی از صنایع اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای جهان است؛ از این رو، با توجه به حساسیت‌های روبه‌رشد در زمینه محیط زیست و قابلیت‌های توانمندساز سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری، این مقاله به ارائه نوعی سیستم پشتیبانی تصمیم مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در مسئله تصمیم‌گیری موازنه میان هزینه انجام پروژه‌های ساخت و میزان انتشار دی اکسید کربن حاصل از اجرای آن در فضای گسسته می‌پردازد. الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک الگوبرداری نام‌گذاری شده است. برای اعتبارسنجی الگوریتم مذکور، نتایج حاصل از اجرای آن برای حل ۱۰۸ مسئله نمونه با اندازه‌های مختلف با عملکرد الگوریتم ژنتیک کلاسیک، مقایسه شده است. نتایج حاصل، گویای برتری رویکرد ارائه‌شده در مقایسه با الگوریتم ژنتیک کلاسیک است.

*واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، انتشار دی اکسید کربن، سیستم پشتیبانی از تصمیم، موازنه  
زمان - هزینه گسسته.*

۱. استادیار گروه صنایع، دانشکده مواد و صنایع، دانشگاه سمنان، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد MBA، دانشکده مواد و صنایع، دانشگاه سمنان، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۸/۲۲

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۴

نویسنده مسئول مقاله: محمدعلی بهشتی نیا

E-mail: beheshtinia@semnan.ac.ir

## مقدمه

در سال‌های اخیر، صنعت ساخت‌وساز به ایجاد دامنه وسیعی از مشکلات زیست‌محیطی، از جمله مصرف زیاد منابع جهان و آلوده کردن محیط اطراف، متهم شده است (دینگ، ۲۰۰۸). بر اساس آمارهای منتشرشده، صنعت ساخت‌وساز یکی از صنایع اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای جهان است. در کشورهای پیشرفته، ۵۰ درصد از هزینه انرژی مصرفی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به صنعت ساخت‌وساز مربوط می‌شود (گزالس و ناوارو، ۲۰۰۶). در مطالعه‌ای که آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا در سال ۲۰۰۹ انجام داد، مشخص شد صنعت ساخت‌وساز یکی از سه بخش مهم تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای در این کشور است (آژانس حفاظت از محیط زیست، ۲۰۰۹). بنا به گفته آکوی و دافی (۲۰۱۰)، ایرلند در سال ۲۰۰۵، حدود ۱۳/۸۱ میلیون تن CO<sub>2eq</sub> در بخش ساخت‌وساز تولید کرد و این میزان انتشار که برابر ۱۱/۷ درصد از کل میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در این کشور است، شامل ۲/۳۷ میلیون تن انتشار مستقیم در مکان پروژه (۱۷ درصد)، ۵/۶۹ میلیون تن انتشار غیرمستقیم حاصل از تولید مواد و مصالح ساختمانی در ایرلند (۴۱ درصد) و ۵/۷۵ میلیون تن انتشار غیرمستقیم حاصل از تولید مواد و مصالح ساختمانی در سایر کشورها بوده است. یان، شن، فن، وانگ و ژانگ (۲۰۱۰) نیز در مطالعه‌ای اعلام کردند که آثار زیست‌محیطی احداث ساختمان‌ها و میزان مصرف انرژی در فرایند تولید و حمل مواد و مصالح ساختمانی و در نتیجه، انتشار گازهای گلخانه‌ای، بسیار شایان توجه است.

بنابراین با توجه به نقش صنعت ساخت‌وساز در تولید گازهای گلخانه‌ای، کنترل و کاهش انتشار این گازها در این صنعت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، اما با اینکه تاکنون بررسی‌های زیادی در زمینه محاسبه میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در صنعت ساخت‌وساز و اثرهای زیست‌محیطی آن صورت گرفته است، همچنان سیستم پشتیبانی تصمیم‌کارا و مؤثری برای کمک به تصمیم‌گیرندگان این صنعت برای انتخاب راه‌حل بهینه برای مقابله با آثار زیست‌محیطی و کاهش انتشار کربن، وجود ندارد (لیو، تائو و مینگ‌تام، ۲۰۱۳).

در اغلب پروژه‌های ساختمانی، عوامل کلیدی موفقیت بر اساس زمان، هزینه و کیفیت، تعیین می‌شوند و تصمیم‌گیرندگان، به‌ندرت مسائل زیست‌محیطی را در پروژه‌های خود در نظر می‌گیرند (لیو، تائو و مینگ‌تام، ۲۰۱۳). از این رو، در این مقاله سیستم پشتیبانی تصمیم‌کارا و مؤثری با رویکردی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله موازنه هزینه - انتشار دی‌اکسیدکربن گسسته در پروژه‌های ساخت ارائه می‌شود که در آن، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از

ارائه سیستم پشتیبانی تصمیم نوین به منظور موازنه هزینه ... \_\_\_\_\_ ۲۵

اجرای پروژه‌های ساخت، شاخصی برای کنترل آثار مخرب زیست‌محیطی این‌گونه پروژه‌ها در نظر گرفته شده است.

سیستم پشتیبان تصمیم، زیرمجموعه سیستم اطلاعات مدیریت است. این سیستم مبتنی بر رایانه، سازگار، انعطاف‌پذیر و محاوره‌ای است که به کمک مدل‌ها و قواعد پایگاه داده جامع، بصیرت فرد تصمیم‌گیرنده را در اتخاذ تصمیم‌های اجرایش در حل مسائلی که با مدل‌های علم مدیریت به راحتی حل نمی‌شوند، هدایت می‌کند. هر سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری به دنبال دستیابی به سه هدف اصلی است:

۱. کمک به مدیر برای تصمیم‌گیری؛

۲. پشتیبانی از تصمیم‌های اتخاذشده مدیر و نه جایگزینی آن؛

۳. بهبود کارایی تصمیم‌گیری و توجه بیشتر به اثربخشی آن.

الگوریتم ژنتیک به کاررفته در سیستم پشتیبانی تصمیم این پژوهش، از نوع جدیدی است که الگوریتم ژنتیک الگوبرداری (IGA)<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و از مفهوم گروه مرجع در جامعه‌شناسی، به منظور حل مسئله تصمیم‌گیری استفاده می‌کند. رابرت مرتن، جامعه‌شناس معروف آمریکایی، نخستین بار مفهوم گروه مرجع را مطرح کرد. وی معتقد است که گروه مرجع، متولی انتقال برخی هنجارها و تأمین ملاک‌ها، معیارهای ارزیابی و محک رفتارها و باورهای افراد است. مدل الگو، شخصی است که رفتاری نمونه یا موفق دارد، یا می‌تواند مرجع تقلید دیگران، به‌ویژه افراد جوان باشد (کالهن، ۲۰۱۰). گروه‌های مشخصی که مبنای مقایسه و مراجعه انتخاب می‌شوند، قدرت نفوذ و تأثیرگذاری بر گرایش‌ها و رفتار آنها را دارند، حتی اگر عضو گروه نباشند (داوسون و چتمن، ۲۰۰۱). در IGA نظریه گروه مرجع مرتن بر الگوریتم ژنتیک پیاده شده است و برای اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم IGA، نتایج حاصل از این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک کلاسیک مقایسه شده است.

بدین ترتیب، نوآوری‌های پژوهش حاضر ارائه مدل ریاضی برای مسئله موازنه هزینه - انتشار دی‌اکسیدکربن گسسته و ارائه الگوریتم ژنتیکی نوین، بر مبنای مفهوم گروه‌های مرجع در جامعه‌شناسی برای تصمیم‌گیری در حوزه مذکور است. اهمیت این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که بهبود روش‌های کارآمد برای پردازش داده‌ها مانند الگوریتم ژنتیک، می‌تواند زمینه‌ای برای افزایش اثربخشی سیستم‌های اطلاعاتی و سیستم‌های پشتیبانی از تصمیم ایجاد کند و به سازمان‌ها برای استفاده اثربخش‌تر از ابزارهای فناوری اطلاعات، یاری رساند.

ساختار مقاله، در ادامه بدین ترتیب است؛ در بخش دوم پیشینه نظری و عملی مطالعات صورت گرفته در این حوزه بیان شده است. جزئیات مدل ریاضی مسئله، در بخش سوم آورده شده است. بخش چهارم به شرح الگوریتم‌های IGA اختصاص داده شده است. حل مسائل نمونه و نتیجه حاصل از اعتبارسنجی الگوریتم ارائه شده را می‌توان در بخش پنجم مشاهده کرد و در بخش ششم، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نهایی از این پژوهش آورده شده است.

### پیشینه پژوهش

مسئله زمان‌بندی پروژه، از جمله مسائلی است که تا کنون بسیار در کانون توجه قرار گرفته است و در مدیریت منابع سازمانی نقش مهمی دارد. در این مسائل، پس از شناسایی فعالیت‌های هر پروژه، بر اساس رابطه میان فعالیت‌ها به زمان‌بندی اجرای پروژه‌ها پرداخته می‌شود. هدف کلی در این گونه مسائل، بهینه‌سازی مجموعه‌ای از اهداف مد نظر با در نظر گرفتن روابط پیش‌نیاز و پس‌نیاز میان فعالیت‌ها و محدودیت‌های میان منابع است (سینگ و ارنست، ۲۰۱۱). یکی از انواع مسائل زمان‌بندی پروژه‌ها، مسئله زمان‌بندی پروژه‌ها با منابع محدود است. در مبحث زمان‌بندی پروژه‌ها با منابع محدود، محاسبه‌های تکمیل پروژه بر این فرض استوارند که فعالیت‌های اجرای پروژه و به‌ویژه فعالیت‌های واقع بر مسیر بحرانی، همگی در زمان معمولی تخمین زده شده انجام شوند؛ حال آنکه در مواقع بسیاری لازم می‌شود پروژه زودتر از تاریخ محاسبه شده پیشین تکمیل شود. در واقع، در اغلب پروژه‌های واقعی، همواره مدیران پروژه نیاز دارند که میان زمان تکمیل پروژه و هزینه کلی آن، موازنه انجام دهند (که و ما، ۲۰۱۴)؛ در حالی که این امر موجب افزایش هزینه‌های مستقیم پروژه می‌شود (داویس، ۱۹۷۴)، اما در مقابل با کاهش زمان تکمیل پروژه، صرفه‌جویی‌هایی برای پیمانکاران و صاحبکار عاید می‌شود. بدین ترتیب در تدوین برنامه پروژه، همواره تلاش می‌شود بیشترین میزان فشردگی در زمان اجرای پروژه و کمترین مقدار افزایش هزینه‌های آن در نظر گرفته شود. به همین دلیل، به این روش موازنه زمان - هزینه نیز گفته می‌شود. بنا به گفته فنگ، لیو و برنز (۱۹۹۷)، موازنه زمان - هزینه، یکی از مهم‌ترین جنبه‌های برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌های ساخت محسوب می‌شود. مسائل موازنه زمان - هزینه را می‌توان از دیدگاه‌های گوناگونی چون توابع هدف مد نظر آنها یا نوع رابطه میان توابع هدف دسته‌بندی کرد.

مسائل موازنه زمان - هزینه، از نظر نوع رابطه میان توابع هدف به دو دسته مسائل پیوسته و گسسته تقسیم می‌شوند. در حالت پیوسته، رابطه میان توابع هدف با کمک توابع تعریف و برقرار می‌شود، اما با پیشرفت تحقیقات و افزایش نیاز به حل این مسائل در عمل، محققان بر توسعه

روش‌های حل مسائل گسسته متمرکز شده‌اند (توانا، ابطحی و خلیلی دامغانی، ۲۰۱۴). در این حالت، ارتباط میان توابع هدف گوناگون در پروژه، در نقاط گسسته بررسی قرار می‌گیرد. برای توضیح این گفته باید یادآوری کرد که اغلب، انجام هر یک از فعالیت‌های پروژه با روش‌های گوناگونی امکان‌پذیر است که هر یک از این روش‌ها می‌تواند زمان و هزینه متفاوتی داشته باشد. بدین ترتیب با انتخاب هر روش برای انجام هر یک از فعالیت‌های پروژه، زمان و هزینه کل پروژه متفاوت خواهد بود. در این حالت، مدیران پروژه به دنبال انتخاب روش‌هایی هستند که بهینه‌ترین ترکیب زمان - هزینه به دست آید.

شایان ذکر است مسائل موازنه زمان - هزینه گسسته، از جمله مسائل NP-Hard محسوب می‌شوند (لیو و همکاران، ۱۹۹۵)، اما تعریف مسئله موازنه به صورت گسسته، از یک سو به دلیل نزدیک بودن به آنچه در عمل انجام می‌گیرد و از سوی دیگر، به دلیل امکان افزایش تعریف مسئله و برقراری ارتباط میان ابعاد و اهداف گوناگون، طی سال‌های اخیر بسیار در کانون توجه بوده است. این روش به ویژه در مسائلی صادق است که علاوه بر زمان و هزینه، به ابعاد دیگری نیز توجه کرده‌اند. بنابراین در حال حاضر، تعریف مسئله به صورت گسسته بسیار رایج است و این نوع تعریف در مقاله‌های گوناگون منتشر شده پژوهشگران دیده می‌شود که از جمله آنها می‌توان به مقاله‌های کلهر، خانزادی و اشتهاردیان (۲۰۱۱)، مختاری، برادران کاظم‌زاده و سلماس‌نیا (۲۰۱۱)، سونمز و بتمیر (۲۰۱۲)، کلانسک و سوندر (۲۰۱۲) و نی‌پور افروزی، روغنیان، نجفی و مازینیانی (۲۰۱۳) اشاره کرد. در پژوهش حاضر نیز، مسئله به صورت گسسته است.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، تحقیقات این حوزه را می‌توان از نظر توابع هدف در نظر گرفته شده نیز دسته‌بندی کرد. اغلب مسائل موازنه‌ای که برای برنامه‌ریزی پروژه‌ها تعریف می‌شوند، زمان و هزینه را در نظر می‌گیرند (که و ما، ۲۰۱۴؛ پاتاک و سیواستاوا، ۲۰۱۴ و که ۲۰۱۴). البته طی سال‌های اخیر، توجه به کیفیت نیز به منزله تابع هدف در کنار زمان و هزینه، در تعریف این‌گونه مسائل افزایش داشته است و در تحقیقات اخیر، شاخص کیفیت نیز به چشم می‌خورد (توانا و همکاران، ۲۰۱۴؛ مقسمی، نیکو، خاکسار فسایی و آداموسکی ۲۰۱۴).

با اینکه تاکنون بررسی‌های زیادی در زمینه محاسبه میزان انتشار دی‌اکسید کربن در صنعت ساخت‌وساز و اثرهای زیست‌محیطی آن صورت گرفته است، همچنان سیستم پشتیبانی تصمیم کارا و مؤثری برای کمک به تصمیم‌گیرندگان این صنعت به منظور انتخاب راه‌حل بهینه برای مقابله با آثار زیست‌محیطی و کاهش انتشار کربن، وجود ندارد (لیو و همکاران، ۲۰۱۳) و در پژوهش‌های اندکی می‌توان توجه به آثار زیست‌محیطی را در کنار عواملی مانند هزینه و زمان اجرای پروژه‌ها مشاهده کرد. دو نمونه از پژوهش‌هایی که به آثار زیست‌محیطی پروژه‌ها توجه

کرده‌اند، پژوهش سو، ژنگ، زنگ، وو و شن (۲۰۱۲) و لیو و دیگران (۲۰۱۳) است. سو و همکارانش (۲۰۱۲) طی مطالعه‌ای محیط خارجی پروژه را بررسی کردند و بدین منظور، شاخص‌هایی مانند، آلودگی هوا، آب، خاک، پسماندهای جامد، آلودگی صوتی و ... را در نظر گرفتند و به کمی‌سازی تأثیر هر یک از روش‌های انجام فعالیت‌ها بر اساس این شاخص‌ها پرداختند. در پژوهش لیو و همکاران (۲۰۱۳)، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از اجرای پروژه، شاخصی برای سنجش آثار زیست‌محیطی اجرای پروژه‌ها در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر از روش لیو و همکاران (۲۰۱۳) برای محاسبه میزان انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از اجرای فعالیت‌های پروژه استفاده شده است. بر اساس آنچه در پژوهش لیو و همکاران (۲۰۱۳) آورده شده است، دی‌اکسیدکربن منتشرشده در اجرای پروژه‌ها به دو بخش انتشار مستقیم و انتشار غیرمستقیم تقسیم می‌شود. منظور از انتشار مستقیم، دی‌اکسیدکربنی است که طی فرایند ساخت و ساز و استفاده از منابع در فضای پروژه منتشر می‌شود. این میزان دی‌اکسیدکربن به دلیل مصرف برق و سوزاندن سوخت برای جابه‌جایی و نصب کلیه اجزا طی ساخت، تولید می‌شود. انتشار غیرمستقیم دی‌اکسیدکربن ناشی از به‌کارگیری منابعی است که مصرف آنها در فضای پروژه، به‌طور مستقیم موجب انتشار دی‌اکسیدکربن نمی‌شود. به بیان دیگر، این میزان انتشار به مصرف مصالح ساختمانی و میزان دی‌اکسیدکربن تولیدشده در فرایند تولید و حمل‌ونقل آنها اشاره دارد.

بدین ترتیب با در اختیار داشتن ضریب انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از مصرف برق و دیزل و ضریب انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از تولید هر واحد مصالح ساختمانی و همچنین با آگاهی از میزان مصرف برق و دیزل یا مصالح برای اجرای فعالیت‌ها، می‌توان میزان انتشار دی‌اکسیدکربن را حین اجرای فعالیت‌های پروژه، محاسبه کرد. باید یادآوری کرد که ضریب انتشار دی‌اکسیدکربن برق و دیزل، در آثار بوچانان و هانی (۱۹۹۴)، گزالس و ناوارو (۲۰۰۶)، دیاموندی و تومپا (۲۰۰۸) و همچنین در پایگاه اینترنتی ردپای کربن<sup>۱</sup> مشاهده می‌شود.

با توجه به اهمیت توجه به آثار زیست‌محیطی پروژه‌های ساخت و همچنین بی‌توجهی به تدوین سیستم پشتیبان تصمیم‌کارا برای در نظر گرفتن آثار زیست‌محیطی پروژه‌ها در مرحله برنامه‌ریزی آنها، در پژوهش حاضر تلاش شده است مدل ریاضی موازنه هزینه - انتشار دی‌اکسیدکربن گسسته‌ای برای برنامه‌ریزی پروژه تعریف شود.

بر خلاف پژوهش لیو و همکاران (۲۰۱۳) که در آن برای تعریف مدل ریاضی انجام هر فعالیت، گزینه‌های گوناگونی از منابع در نظر گرفته شده است، در این پژوهش روش‌های

گوناگونی برای انجام فعالیت‌ها مد نظر قرار می‌گیرد و هر یک از این روش‌ها، زمان، هزینه و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن متفاوتی دارند. بدین ترتیب، مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش کارایی بیشتری دارد و جامعیت‌بخشیدن به آن نیز راحت‌تر است. در این پژوهش، الگوریتمی جدید با عنوان IGA برای حل مدل مذکور ارائه شده است.

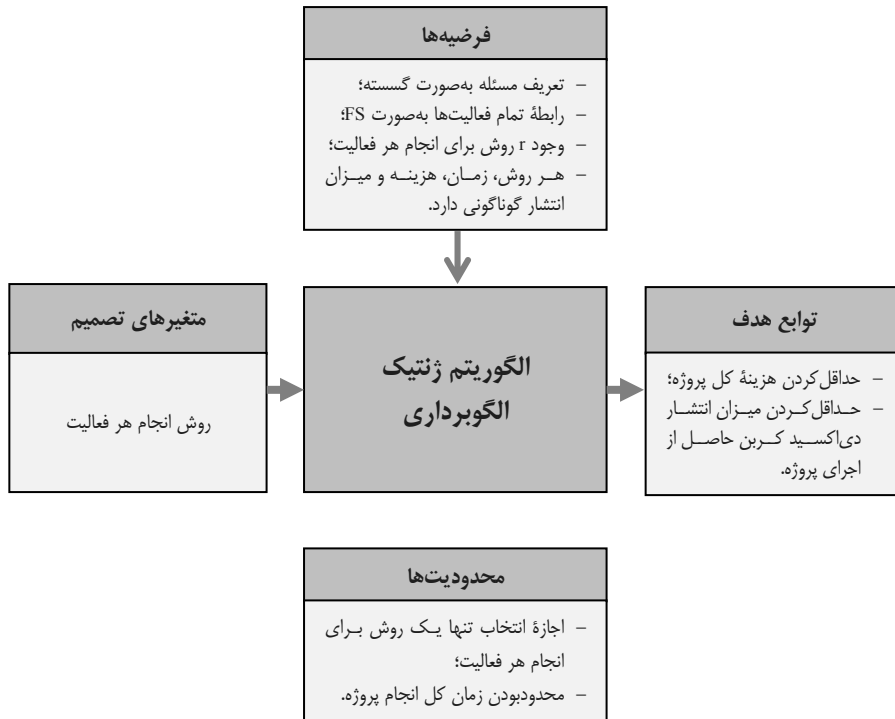
تاکنون روش‌های گوناگونی برای حل این مسائل به کار گرفته شده است که به سه دسته کلی زیر تقسیم می‌شوند:

۱. برنامه‌ریزی ریاضی؛
۲. روش‌های ابتکاری؛
۳. الگوریتم‌های فرا ابتکاری.

بنا به گفته فنگ و همکارانش (۱۹۹۷)، برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های فرا ابتکاری نسبت به سایر روش‌ها برترند. روش‌های ابتکاری نیز تضمین نمی‌کنند جواب بهینه‌ای قطعی برای مسئله محاسبه کنند، اما جواب‌های خوبی می‌دهند. به‌طور کلی در این روش‌ها، رابطه میان زمان و هزینه به‌صورت خطی در نظر گرفته می‌شود و این روش‌ها دامنه‌ای از راه‌حل‌های ممکن را در اختیار کاربر نمی‌گذارند (آگراوال، اپادهیای و پاتاک، ۲۰۱۳). مسائل موازنه زمان - هزینه، مسائل بهینه‌سازی چندهدفه‌اند (دو تابع هدف زمان و هزینه) که باید به‌صورت هم‌زمان، بهینه شوند. برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های فرا ابتکاری، نسبت به سایر روش‌ها برترند. به‌طور کلی، بنا به گفته رحیمی و ایران منش (۲۰۰۸) الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای مسائل موازنه متوسط و بزرگ، پاسخ‌های بهتری را به دست می‌دهند. روش‌های فرا ابتکاری نیز توانسته‌اند مسائل موازنه چندهدفه را حل کنند (توانا و همکاران، ۲۰۱۴).

لیت و لاو (۱۹۹۷) بر این باورند که مسئله موازنه زمان - هزینه، همانند سایر مسائل بهینه‌سازی ترکیبی، برای به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک مناسب است. با توجه به قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک برای حل این‌گونه مسائل، در پژوهش حاضر تلاش شده است با بهره‌گیری از نظریه الگوبرداری مرتن، جامعه‌شناس آمریکایی، عملکرد این الگوریتم نسبت به روش کلاسیک آن بهبود یابد.

جزئیات مربوط به مدل ریاضی ارائه‌شده برای موازنه مد نظر، در بخش بعد مطرح می‌شود. شکل ۱ متغیرهای تصمیم‌گیری و نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.



شکل ۱. مدل مسئله تعریف شده

## روش‌شناسی پژوهش

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، هدف این پژوهش ارائه الگوریتم ژنتیک جدیدی با عنوان الگوریتم ژنتیک الگوبرداری است. بدین منظور با ایجاد و حل ۱۰۸ مسئله نمونه در حوزه موازنه هزینه - دی‌اکسید کربن در پروژه‌های ساخت، عملکرد الگوریتم مذکور با الگوریتم ژنتیک کلاسیک مقایسه شده است. بنابراین از نظر روش‌شناسی می‌توان این پژوهش را پژوهشی آزمایشی شمرد. در ادامه مدل ریاضی مسئله، الگوریتم پیشنهادی و نحوه تولید مسائل نمونه شرح داده می‌شود.

## تعریف مسئله

پیش‌تر بیان شد تعریف مسئله موازنه به صورت گسسته، از یک سو به دلیل نزدیک بودن به آنچه در عمل صورت می‌گیرد و از سوی دیگر، به دلیل افزایش قابلیت تعریف مسئله و برقراری ارتباط میان ابعاد و اهداف متفاوت، طی سال‌های اخیر در کانون توجه بوده است. از این رو، در پژوهش



حاضر نیز مسئله تعریف شده به صورت گسسته است. بر این اساس، هر یک از فعالیت‌های پروژه را می‌توان به روش‌های گوناگونی انجام داد که هر یک از این روش‌ها هزینه، زمان و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن متفاوتی دارند. هدف مد نظر، یافتن مجموعه بهینه از روش‌هایی است که میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و هزینه انجام پروژه را بهینه کند و در همین حال، زمان انجام پروژه از حد بالای برآورد شده برای آن بیشتر نشود.

### فرضیه‌ها و محدودیت‌های مسئله

هر پروژه‌ای شامل  $n$  فعالیت است که از ۱ تا  $n$  شماره‌گذاری می‌شود، ضمن آنکه هر پروژه را می‌توان با شبکه  $G = (V, E)$  نشان داد که در آن،  $V$  بیانگر گره‌ها یعنی فعالیت‌های پروژه و  $E$  بیانگر بردارها یا همان ارتباط میان فعالیت‌ها است (با فرض نشان دادن شبکه، به صورت شبکه گرهی). همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، هر فعالیت می‌تواند به  $r(i) \in k$  روش انجام شود که هر روش  $k$ ، زمان  $(d_{ik})$ ، هزینه  $(c_{ik})$  و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن  $(e_{ik})$  منحصر به فردی دارد. فرضیه‌ها و محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای این مسئله به شرح زیر فهرست شده است:

- مسئله به صورت گسسته تعریف شده است؛
- فضای تعریف مسئله به صورت قطعی در نظر گرفته شده است؛
- شبکه گرهی فعالیت‌های پروژه مشخص است؛
- فعالیت‌ها، FS رابطه دارند؛
- هر فعالیت زمانی آغاز می‌شود که فعالیت‌های پیش از آن به پایان برسد؛
- تمام فعالیت‌های پروژه را می‌توان فشرده‌سازی کرد؛
- توابع هدف مد نظر این پژوهش، حداقل کردن هزینه انجام پروژه و حداقل کردن میزان انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از اجرای پروژه است؛
- زمان کل اجرای پروژه بالاترین حد را دارد؛
- فعالیت‌ها اجازه توقف ندارند؛
- برای هر فعالیت،  $r(i)$  روش گوناگون وجود دارد؛
- پس از انتخاب یکی از روش‌ها برای انجام هر فعالیت، تغییر روش دوباره برای آن مجاز نیست؛
- برای سادگی، زمان انجام فعالیت‌ها به صورت عدد صحیح در نظر گرفته شده است؛

- انتشار دی اکسیدکربن، شامل انتشار مستقیم (ناشی از مصرف برق و دیزل تجهیزات در هنگام ساخت) و انتشار غیرمستقیم (ناشی از تولید و حمل مواد و مصالح مصرفی پروژه) است.

### مدل ریاضی مسئله

پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱. پارامترهای به‌کاررفته در مسئله

اندیس‌ها	
اندیس فعالیت‌ها	$i, j$
اندیس روش اجرای فعالیت‌ها	$K$
اندیس مصالح به‌کاررفته برای انجام فعالیت‌ها	$L$
پارامترها	
تعداد فعالیت‌های واقعی پروژه	$N$
تعداد مصالح به‌کاررفته برای انجام فعالیت‌ها	$M$
بالاترین زمان ممکن برای اتمام پروژه	$T$
تعداد روش‌های انجام هر فعالیت	$r(i)$
هزینه فعالیت $i$ به روش $k$	$c_{ik}$
وقفه مجاز (lag) میان فعالیت $i$ و $j$	$L_{ij}$
دوره انجام فعالیت $i$ به روش $k$	$d_{ik}$
مقدار برق مصرف‌شده در مکان اجرای پروژه برای فعالیت $i$ به روش $k$	$Q_{ed_{ik}}$
مقدار دیزل مصرف‌شده در مکان پروژه برای فعالیت $i$ به روش $k$	$Q_{ad_{ik}}$
ضریب انتشار دی‌اکسیدکربن مصرف هر واحد برق	$F_e$
ضریب انتشار دی‌اکسیدکربن مصرف هر واحد دیزل	$F_d$
مقدار مصرف ماده $l$ ام برای فعالیت $i$ به روش $k$	$Q_{l_{ik}}$
ضریب انتشار دی‌اکسیدکربن تولید هر واحد ماده $l$ ام	$F_l$
مقدار برق مصرف‌شده برای حمل ماده $l$ ام برای فعالیت $i$ به روش $k$	$Q_{el_{ik}}$
مقدار دیزل مصرف‌شده برای حمل ماده $l$ ام برای فعالیت $i$ به روش $k$	$Q_{dl_{ik}}$
متغیرهای تصمیم‌گیری	
پارامتر باینری: برابر یک، اگر فعالیت $i$ به روش $k$ انجام شود و برابر صفر، اگر فعالیت $i$ به روش $k$ انجام نشود.	$x_{ik}$

با در نظر گرفتن فرضیه‌ها و محدودیت‌های فوق، مدل ریاضی مسئله به صورت رابطه‌های زیر خواهد بود:

$$Min Cost = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} x_{ik} c_{ik} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$Min CO_2 Emission = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} x_{ik} (e_{dik} + e_{inik}) \quad \text{رابطه ۲}$$

S.T.

$$\sum_{k=1}^{r(i)} x_{ik} = 1 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$F_n \leq T \quad \text{رابطه ۴}$$

$$F_i + L_{ij} \leq S_j \quad \forall i, j \quad \text{رابطه ۵}$$

$$e_{dik} = Q_{edik} \times F_e + Q_{ddik} \times F_d \quad \text{رابطه ۶}$$

$$e_{inik} = \sum_{l=1}^m (Q_{lik} \times F_l + Q_{elik} \times F_e + Q_{dl_{ik}} \times F_d) \quad \text{رابطه ۷}$$

$$F_i, S_i \geq 0 \quad \forall i \quad \text{رابطه ۸}$$

$$F_1, S_1 = 0 \quad \text{رابطه ۹}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این مدل رابطه‌های ۱ و ۲، به ترتیب بیانگر توابع هدف هزینه و انتشار دی‌اکسیدکربن هستند. رابطه ۳، تضمین می‌کند هر فعالیت تنها به یک روش انجام شود. رابطه ۴، بیانگر محدودیت زمان کل اجرای پروژه است. رابطه ۵، پیش‌نیاز و پس‌نیاز میان فعالیت‌ها را نشان می‌دهد و بیانگر این است که فعالیت‌های پروژه می‌توانند FS رابطه با یکدیگر داشته باشند. رابطه‌های ۶ و ۷ به ترتیب نحوه محاسبه میزان انتشار مستقیم و غیرمستقیم دی‌اکسیدکربن در هر یک از روش‌های انجام فعالیت را نشان می‌دهند. بر اساس رابطه ۸، زمان شروع پروژه صفر در نظر گرفته می‌شود. رابطه ۹ تضمین می‌کند هیچ‌یک از فعالیت‌های پروژه، زودتر از زمان صفر آغاز نشده است و رابطه ۱۰ بیانگر صفرویک بودن متغیر تصمیم‌گیری است.

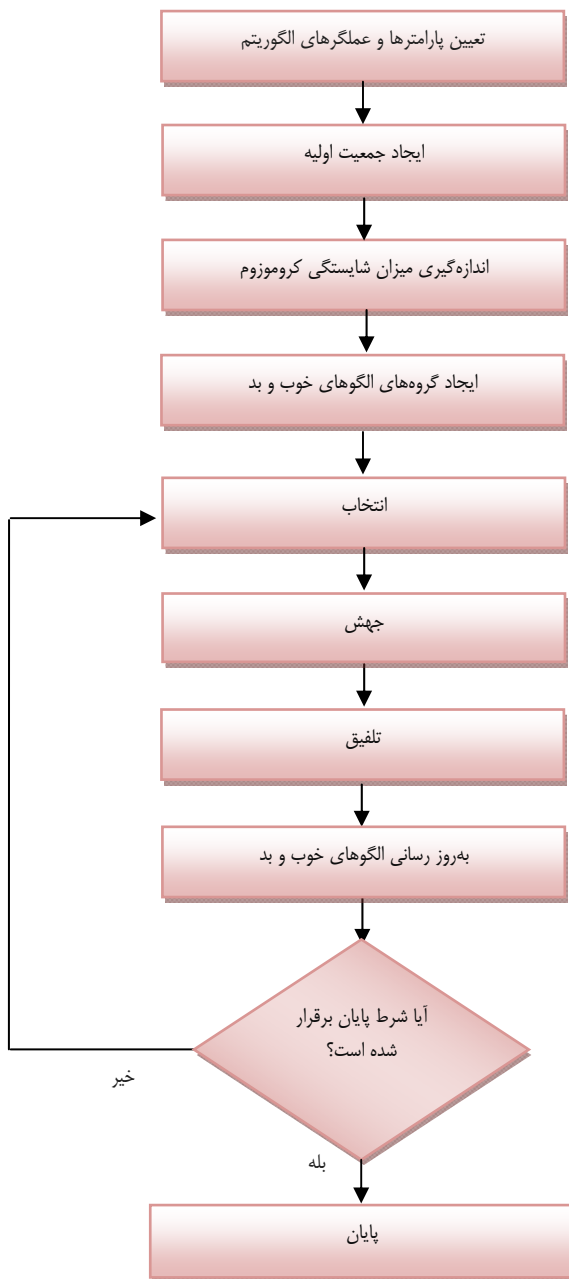
همان‌گونه که اشاره شد، مسئله تعریف‌شده در پژوهش حاضر، مسئله موازنه چندهدفه گسسته است که متغیر تصمیم‌گیری در آن، روش انجام فعالیت‌ها است. این مسئله، از نوع مسائل NP-hard است؛ زیرا با افزایش تعداد روش‌های مختلف انجام فعالیت‌ها، فضای جواب مسئله به‌صورت نمایی افزایش خواهد یافت. برای حل چنین مسائلی، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود. برای حل مدل ریاضی تعریف‌شده، الگوریتم ژنتیک جدیدی به نام IGA ارائه شده است که در آن، نظریه گروه مرجع در جامعه‌شناسی روی الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی می‌شود. جزئیات بیشتر در مورد این الگوریتم، در بخش بعد شرح داده می‌شود.

### الگوریتم IGA

الگوریتم ژنتیک، تاکنون به‌طور گسترده‌ای در حوزه‌های گوناگونی چون مسائل بهینه‌سازی، زمان‌بندی، حمل‌ونقل، هوش مصنوعی و بسیاری دیگر به‌کار رفته است (گلدبرگ، ۱۹۸۹). با نگاهی به مسائل موازنه تعریف‌شده در حوزه کنترل پروژه‌های ساخت نیز می‌توان دریافت، این الگوریتم از پرکاربردترین الگوریتم‌ها بوده است و بسیاری از پژوهش‌ها به‌نوعی از این الگوریتم بهره برده‌اند (نبی‌پور افروزی و همکاران، ۲۰۱۳؛ که، ۲۰۱۴ و که و ما، ۲۰۱۴).

### ساختار کلی الگوریتم

الگوریتم ارائه‌شده در پژوهش پیش رو نیز ساختاری مشابه الگوریتم ژنتیک دارد با این تفاوت که عملگرهای تلفیق و جهش در آن با عملگرهای ژنتیک معمولی متفاوت است. در واقع، الگوریتم ارائه‌شده همان الگوریتم ژنتیک است که با الهام از نظریه رابرت کینگ مرتن بهبود یافته است. مرتن معتقد بود که افراد جامعه خود را با فرد یا گروهی مقایسه می‌کنند که جایگاهی دارند و افراد جامعه علاقه‌مندند به آن جایگاه دست یابند (هولتن، ۲۰۰۴). نمونه‌ای از این تقلیدها، الگوبرداری افراد (به‌ویژه جوانان) از هنرمندان و قهرمانان ورزشی است. بنابراین، برای طراحی عملگرهای تلفیق و جهش در الگوریتم پیشنهادشده نیز از این مفهوم بهره برده شده است. در این الگوریتم مجموعه‌ای از  $k$  کروموزوم که از بهترین مقدار تابع هدف شکل گرفته‌اند، در مجموعه‌ای با نام مجموعه‌الگوهای خوب جامعه قرار می‌گیرند و فهرستی از  $k$  کروموزوم که بدترین مقدار تابع هدف را دارند با عنوان مجموعه‌الگوهای بد جامعه در نظر گرفته می‌شوند. کروموزوم‌ها در جامعه سعی دارند خود را شبیه الگوهای خوب کنند و از الگوهای بد متفاوت باشند. پیش از توضیح در مورد عملگرهای تلفیق و جهش، فرایندهای مشابه‌سازی و متفاوت‌سازی کروموزوم‌ها شرح داده می‌شود. نمودار IGA در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم IGA

شایان ذکر است ساختار کروموزوم‌ها برای حل مدل ریاضی ارائه شده، به صورت رشته‌هایی است که تعداد ژن‌های آنها برابر با تعداد فعالیت‌های پروژه است و مقدار هر ژن نشان‌دهنده روش انجام هر فعالیت است. نمونه‌ای از کروموزوم در شکل ۳ نشان داده شده است. در این کروموزوم فرض شده است پروژه‌ای ۱۰ فعالیت دارد و هر یک از فعالیت‌ها را می‌توان با شش روش انجام داد.

۱	۳	۵	۲	۲	۶	۱	۴	۵	۳
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۳. نمونه‌ای از کروموزوم برای پروژه‌ای با ۱۰ فعالیت و شش روش برای انجام هر یک از آنها

### عملگرهای تلفیق و جهش

قبل از بیان عملگرهای تلفیق و جهش در IGA، دو فرایند با عنوان شبیه‌سازی و متفاوت‌سازی تبیین می‌شود و پس از آن به نحوه عملکرد آنها پرداخته خواهد شد.

### فرایند مشابه‌سازی

فرایند مشابه‌سازی، فرایندی است که میان دو کروموزوم رخ می‌دهد. طی این فرایند، یکی از کروموزوم‌ها نقش الگو را دارد و دیگری نقش تأثیرپذیرنده را ایفا می‌کند. با اجرای این فرایند، برخی از ویژگی‌های الگو به کروموزوم تأثیرپذیرنده انتقال می‌یابد. در این فرایند، به صورت تصادفی ژنی (روش انجام فعالیت) از کروموزوم تأثیرپذیرنده انتخاب می‌شود. اگر مقدار تخصیص یافته به ژن در کروموزوم تأثیرپذیرنده با مقدار تخصیص یافته به ژن مشابه در کروموزوم الگو متفاوت باشد، مقدار ژن کروموزوم تأثیرپذیرنده به مقدار ژن در کروموزوم الگو، تغییر می‌یابد. این در حالی است که اگر مقدار ژن در کروموزوم تأثیرپذیرنده با مقدار ژن مشابه در کروموزوم الگو یکسان باشد، به هیچ تغییری نیاز نخواهد بود. میزان تأثیرپذیری کروموزوم تأثیرپذیرنده از کروموزوم الگو نیز ممکن است متفاوت باشد. به این منظور در هر بار اجرای فرایند شبیه‌سازی، عددی تصادفی بین صفر و یک انتخاب شده و در تعداد ژن‌های کروموزوم ضرب می‌شود، از این طریق مقدار جزء صحیح آن به دست می‌آید. عدد حاصل، تعداد مرتبه‌هایی است که فرایند شبیه‌سازی باید تکرار شود.

### فرایند متفاوت‌سازی

این فرایند نیز مشابه فرایند مشابه‌سازی، میان دو کروموزوم که یکی از آنها نقش الگو و دیگری نقش کروموزوم تأثیرپذیرنده را دارد، رخ می‌دهد. طی این فرایند سعی می‌شود برخی از

ویژگی‌های کروموزوم تأثیرپذیرنده با کروموزوم الگو متفاوت شود. در فرایند متفاوت‌سازی، ژنی از کروموزوم تأثیرپذیرنده به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و با ژن نظیر در کروموزوم الگو مقایسه می‌شود. اگر مقدار ژن انتخاب‌شده در کروموزوم تأثیرپذیرنده (روش انجام فعالیت)، با مقدار ژن کروموزوم الگو یکسان باشد، باید مقدار ژن در کروموزوم تأثیرپذیرنده به صورت تصادفی به مقدار مجاز دیگری تغییر یابد، اگر کروموزوم انتخاب‌شده در کروموزوم تأثیرپذیرنده با مقدار ژن نظیرش در کروموزوم الگو متفاوت باشد، به هیچ تغییری نیاز نخواهد بود. میزان تأثیرپذیری کروموزوم تأثیرپذیرنده از کروموزوم الگو، مطابق فرایند شبیه‌سازی با عدد تصادفی بین صفر و یک مشخص می‌شود.

در الگوریتم پیشنهادی مطالعه حاضر، برای طراحی عملگرهای جهش و تلفیق، از فرایندهای مشابه‌سازی و متفاوت‌سازی استفاده شده است که در ادامه به شرح آن دو پرداخته می‌شود.

### عملگر جهش

در هر جامعه، همواره الگوهای بد و الگوهای خوب یافت می‌شود و مردم تلاش می‌کنند به ویژگی‌های الگوهای خوب نزدیک شوند و از ویژگی‌های الگوهای بد دور بمانند. بر همین اساس، عملگر جهش در الگوریتم IGA، در دو مرحله اجرا می‌شود. در مرحله اول، پس از انتخاب تصادفی یک کروموزوم از جمعیت موجود به نشانه کروموزوم تأثیرپذیرنده و یک کروموزوم تصادفی از مجموعه الگوهای خوب به منزله کروموزوم الگو، فرایند مشابه‌سازی برای آنها اجرا می‌شود. در مرحله دوم نیز یک کروموزوم تصادفی از جمعیت موجود به عنوان کروموزوم تأثیرپذیرنده و یک کروموزوم تصادفی از مجموعه الگوهای بد به منزله کروموزوم الگو انتخاب‌شده و فرایند متفاوت‌سازی برای آنها اجرا می‌شود. تعداد تکرار عملگر جهش، یکی از پارامترهای الگوریتم IGA است که با Mute\_rate نشان داده می‌شود.

### عملگر تلفیق

جدا از الگوها، مردم هر جامعه‌ای از یکدیگر نیز تأثیر می‌پذیرند. در طراحی عملگر تلفیق الگوریتم IGA نیز از این مفهوم الهام گرفته شده است. بدین ترتیب، دو کروموزوم تصادفی از جمعیت موجود (بدین منظور از چرخ رولت استفاده شده است) انتخاب می‌شود که یکی از آنها به منزله الگو و دیگری کروموزوم تأثیرپذیرنده فرض می‌شود و فرایند مشابه‌سازی یا متفاوت‌سازی برای آنها به اجرا درمی‌آید. در پژوهش حاضر، برای اعمال عملگر تلفیق، فقط از فرایند مشابه‌سازی استفاده شده است. تعداد تکرار عمل تلفیق، یکی از پارامترهای الگوریتم IGA است و با Cross\_rate نشان داده می‌شود.

### تابع شایستگی

ارزیابی کروموزوم‌های نسل‌ها به کمک تابع شایستگی صورت می‌گیرد. شایستگی کروموزوم‌ها، بر اساس عملکرد آنها در تحقق توابع هدف سنجیده می‌شود. بنابراین تابع شایستگی باید در ارتباط با توابع هدف مسئله تعریف شود. تابع شایستگی این پژوهش برگرفته از تابع شایستگی ارائه شده در منبع ژانگ و زینگ (۲۰۱۰) است و بر اساس آن تابع شایستگی به صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌شود.

$$Fitness = \sum_{o=1}^O w_o u_o \quad F \in [0,1], u_o \in [0,1] \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در این رابطه،  $O$  بیانگر تعداد توابع هدف،  $w_o$  وزن تابع هدف و  $u_o$  نیز، مقدار نرمال شده تابع هدف است. همچنین  $\sum_{o=1}^O w_o = 1$  است. در این رابطه، مقدار  $u_o$  برای هر یک از توابع هدف، از رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$u_{Emission} = \frac{E^+ - E}{E^+ - E^-} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$u_{Cost} = \frac{C^+ - C}{C^+ - C^-} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

برای محاسبه میزان انتشار یا هزینه بیشینه و کمینه در هر مسئله، به ترتیب روش‌هایی برای انجام فعالیت‌ها در نظر گرفته می‌شود که بیشترین و کمترین میزان انتشار یا هزینه را دارند. بنابراین در هر مسئله این مقادیر ثابت خواهند بود. تابع شایستگی مدل ریاضی پیشنهادی این پژوهش در رابطه ۱۴ نشان داده شده است.

$$Max Fitness = w_1 \times u_{Cost} + w_2 \times u_{Emission} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

### عملگر انتخاب

برخی از کروموزوم‌های نسل بعدی بر اساس نخبه‌گرایی انتخاب می‌شوند و بر این اساس، کسری از جمعیت با بالاترین مقادیر تابع شایستگی به‌طور مستقیم به نسل بعدی انتقال می‌یابند (این کسر با best نشان داده می‌شود و از پارامترهای الگوریتم ژنتیک است). سایر کروموزوم‌ها نیز به کمک چرخ رولت انتخاب شده و عملگرهای جهش و تلفیق روی آنها اعمال می‌شود.



## معیار توقف

اگر بهترین مقدار تابع شایستگی کروموزوم ها در چند نسل متوالی بهبود نیابد، الگوریتم به پایان می‌رسد. تعداد این تکرارهای متوالی را پارامتری با نام termination مشخص می‌کند. پس از اجراهای تجربی متعدد، مشخص شد در الگوریتم پیشنهادی به ترتیب مقادیر ۶۰ درصد و ۳۰ درصد، برای Cross\_rate و Mute\_rate نتایج بهتری به دست می‌دهد. جمعیت هر نسل (Pop\_size) و میزان نخبه‌گرایی (best)، به ترتیب، ۱۰۰ کروموزوم و ۱۰ درصد تعیین شد. معیار توقف (termination) نیز برای مسائل بزرگ و متوسط، ۱۰۰ و برای مسائل کوچک، ۲۰ تشخیص داده شد. تعداد اعضای هر یک از گروه‌های الگوی خوب و بد نیز پنج عضو تعیین شد. در بخش بعد، الگوریتم IGA برای حل مسائل نمونه به کار گرفته شده است و برای اعتبارسنجی الگوریتم ارائه شده، نتایج حاصل از اعمال آن با نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک کلاسیک مقایسه شدند.

## آزمایش‌های عددی

برای اعتبارسنجی الگوریتم ارائه شده، ۱۰۸ مسئله نمونه در اندازه‌های گوناگون ایجاد شد و پس از حل این مسائل به کمک دو روش الگوریتم ژنتیک کلاسیک و الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از هر دو روش مقایسه شدند. کلیه عملگرها و پارامترها در الگوریتم ژنتیک کلاسیک مشابه IGA است با این تفاوت که الگوریتم ژنتیک کلاسیک ساختاری معمولی دارد. نحوه تولید مسائل تصادفی و نتایج حاصل از حل آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک کلاسیک و IGA در ادامه آورده شده است.

## تولید مسائل تصادفی

مسئله مد نظر از پارامترهای متعددی مانند تعداد فعالیت، روش انجام هر فعالیت، زمان هر فعالیت و حد بالای زمان کل اجرای پروژه شکل گرفته است. به منظور ایجاد طیف متنوعی از مسائل برای هر یک از این پارامترها، سطوحی مانند کم، متوسط و بالا در نظر گرفته شده است. برای پارامتر تعداد فعالیت، مقادیر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ و برای پارامتر تعداد روش‌های انجام هر فعالیت نیز سه مقدار ۲، ۴ و ۶ حالت فرض شده است. از سوی دیگر برای پارامتر زمان انجام هر فعالیت، سه حالت متفاوت تعریف شده است. در حالت اول زمان‌ها به صورت تصادفی از بازه [۱، ۱۰] و در حالات دوم و سوم نیز زمان‌ها به ترتیب از بازه‌های [۱۰، ۴۰] و [۴۰، ۱۰۰] انتخاب می‌شوند. برای پارامتر حد بالای زمان کل اجرای پروژه، از رابطه  $\alpha \times P$  استفاده می‌شود که P از مجموع زمان پردازش فعالیت‌ها (با روشی که شامل بیشترین زمان اجرا است) به دست می‌آید.

برای  $\alpha$  نیز دو مقدار  $0/9$  و  $0/8$  فرض شده است. بنابراین با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف برای تعداد فعالیت‌های پروژه، تعداد روش‌های انجام فعالیت‌ها، بازه‌های مختلف برای زمان انجام فعالیت‌ها و حد بالای زمان کل، می‌توان  $54 (2 \times 3 \times 3 \times 3)$  مسئله تعریف کرد. از هر  $54$  حالت ممکن نیز دو مسئله به صورت تصادفی ایجاد شده است. بدین ترتیب،  $108$  مسئله مختلف ایجاد و بررسی شدند. برای سایر پارامترها تنها یک حالت در نظر گرفته شده است.

مقدار پارامتر میزان انتشار مستقیم دی‌اکسیدکربن فعالیت‌ها، از توزیع یکنواخت بین  $90000$  تا  $500000$  و میزان انتشار غیرمستقیم دی‌اکسیدکربن نیز از توزیع یکنواخت  $200000$  تا  $700000$  انتخاب می‌شود (برای تعیین این بازه‌ها از نظر خبره استفاده شده است). برای پارامتر هزینه فعالیت‌ها نیز از توزیع یکنواخت  $[30,7000]$  استفاده شده است. کلیه کد نویسی‌ها به زبان T-SQL در نرم‌افزار  $2012$  SQL Server انجام گرفت و به کمک رایانه اجرا شد.

### یافته‌های پژوهش

این بخش به بررسی نتایج حاصل از الگوریتم‌ها اختصاص دارد. مقایسه‌ها در سه حالت صورت پذیرفته است. در حالت اول، مقدار  $W_1$  و  $W_2$  (وزن‌های توابع هدف) در تابع شایستگی، هر دو  $0/5$  در نظر گرفته شده است. در حالت دوم  $W_1 = 0/2$  و  $W_2 = 0/8$  و در حالت سوم  $W_1 = 0/8$  و  $W_2 = 0/2$  در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ میانگین جواب نهایی مقدار شایستگی، هزینه و انتشار گاز  $CO_2$  هر دو الگوریتم ارائه شده است. همچنین این جدول تعداد مرتبه‌هایی که IGA جواب بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک کلاسیک داشته است، تعداد مرتبه‌هایی که هر دو الگوریتم جواب یکسانی محاسبه کرده‌اند و تعداد مرتبه‌هایی که IGA جوابی بدتر از الگوریتم ژنتیک کلاسیک داشته است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از دو الگوریتم، بر اساس تعداد فعالیت‌های پروژه، تعداد روش‌های انجام هر فعالیت، بازه زمانی انجام فعالیت‌ها و زمان کل اجرای پروژه، افزاز شده‌اند، با این کار می‌توان از عملکرد الگوریتم‌های به کاررفته در پژوهش تحلیل دقیق‌تری به عمل آورد.

با نگاهی به نتایج به دست آمده (جدول‌های ۲، ۳ و ۴) می‌توان دریافت که IGA از نظر معیار میانگین مقدار شایستگی در حالت کلی، جواب بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک کلاسیک داده است. کوچک بودن اختلاف در میانگین مقدار شایستگی‌ها به دلیل نوع تعریف تابع شایستگی است که مقداری بین صفر و یک را برای شایستگی هر کروموزوم در نظر می‌گیرد. این را می‌توان از شاخص و تعداد برتری‌ها نیز متوجه شد؛ زیرا در هر سه حالت مقدار شاخص NBR از مقدار NWR بیشتر است.

جدول ۲. مقایسه نتایج با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک کلاسیک و IGA در حالت  $W_1 = +/5$  و  $W_2 = +/5$

NWR	NER	NBR	میانگین جواب‌های الگوریتم IGA				
			شایستگی	هزینه	CO <sub>2</sub>		
۲	۲۹	۵	-/۱۶۵۵	۲۰۴۰۴/۵۸۳۳	۶۱۸۵۱۱۶/۹۷۳۲	۱۰	تعداد فعالیت‌ها
۳	۲۹	۴	-/۸۵۲۸۸	۶۴۰۹۹/۲۲۲۲	۱۸۷۱۸۰۵۱/۸۳۳۳	۳۰	
۷	۲۰	۹	-/۱۴۸۹	۱۰۶۹۲۹/۱۶۶۷	۳۱۲۸۵۱۵۰/۷۷۷۸	۵۰	
۰	۳۵	۱	-/۸۵۱۲	۸۱۸۷۸/۲۲۲۲	۲۰۳۴۵۲۹۱/۷۵	۲	تعداد روش‌های انجام فعالیت‌ها
۵	۲۷	۴	-/۸۵۸۷۰۵	۵۹۵۶۳/۴۷۲۲	۱۸۴۹۴۶۲۴/۶۹۴۴	۴	
۷	۱۶	۱۳	-/۸۵۷۴	۴۹۹۹۱/۲۷۷۸	۱۷۳۴۸۴۰۳/۱۳۸۹	۶	
۴	۲۶	۶	-/۸۵۶۱۹	۶۴۱۷۴/۶۳۸۸۹	۱۸۶۹۵۱۹۶/۵	[۱-۱۰]	زمان انجام فعالیت‌ها
۵	۲۳	۸	-/۸۵۱۲	۶۳۶۷۸/۰۵۵۶	۱۸۷۷۴۵۴۴	[۱۰-۴۰]	
۳	۲۹	۴	-/۸۵۹۹	۶۳۵۸۰/۲۷۷۸	۱۸۷۱۸۵۷۹/۰۸۳۳	[۴۰-۱۰۰]	
۸	۳۹	۷	-/۸۵۱۵	۶۵۰۶۳/۲۵۹۳	۱۸۸۴۱۶۸۱/۶۱۱۱	P۰/۹	بازه کل انجام پروژه
۴	۳۹	۱۱	-/۸۶	۶۲۵۵۸/۷۲۲۲	۱۸۶۱۷۱۹۸/۱۱۱۱	P۰/۸	
۱۲	۷۸	۱۸	-/۸۵۵۸	۶۳۸۱۰/۹۹۰۷	۱۸۷۲۹۴۳۹/۸۶۱۱		حالات کلی

NWR	NER	NBR	میانگین جواب‌های الگوریتم ژنتیک کلاسیک				
			شایستگی	هزینه	CO <sub>2</sub>		
۲	۲۹	۵	-/۱۶۴۹	۲۰۲۳۰/۷۵	۶۲۰۷۰۴۳/۳۶۱۱	۱۰	تعداد فعالیت‌ها
۳	۲۹	۴	-/۸۵۲۳۹۳	۶۴۰۲۱/۹۷۲۲	۱۸۷۲۷۶۵۲/۱۶۶۷	۳۰	
۷	۲۰	۹	-/۸۴۸۸	۱۰۶۴۹۰/۰۸۳۳	۳۱۳۳۳۳۴۳/۵۵۵۶	۵۰	
۰	۳۵	۱	-/۸۵۰۷	۸۱۸۳۳/۸۸۸۹	۲۰۳۵۲۳۳۷/۱۳۸۹	۲	تعداد روش‌های انجام فعالیت‌ها
۵	۲۷	۴	-/۸۵۸۷۰۷	۵۹۵۷۳/۷۵	۱۸۴۹۴۰۵۲/۴۱۶۷	۴	
۷	۱۶	۱۳	-/۸۵۷۳	۴۹۳۳۵/۱۶۶۷	۱۷۴۲۰۶۴۹/۵۲۷۸	۶	
۴	۲۶	۶	-/۸۵۶۲۲	۶۴۰۱۸/۸۶۱۱۱	۱۸۷۰۷۴۷۱/۱۶۶۶۷	[۱-۱۰]	زمان انجام فعالیت‌ها
۵	۲۳	۸	-/۸۵۱۱	۶۳۳۰۵/۲۲۲۲	۱۸۸۱۷۳۵۵/۹۷۲۲	[۱۰-۴۰]	
۳	۲۹	۴	-/۸۵۹۴	۶۳۴۱۸/۷۲۲۲	۱۸۷۴۲۲۱۱/۹۴۴۴	[۴۰-۱۰۰]	
۸	۳۹	۷	-/۸۵۱۷	۶۴۸۵۳/۵۵۵۶	۱۸۸۶۰۶۰۶/۸۵۱۹	P۰/۹	بازه کل انجام پروژه
۴	۳۹	۱۱	-/۸۵۹۵	۶۲۳۰۸/۳۱۴۸	۱۸۶۵۰۷۵۲/۵۳۷۰	P۰/۸	
۱۲	۷۸	۱۸	-/۸۵۵۶	۶۳۵۸۰/۹۳۵۲	۱۸۷۵۵۶۷۹/۶۹۴۴		حالات کلی

جدول ۳. مقایسه نتایج با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک کلاسیک و IGA در حالت  $W_1 = 0/5$  و  $W_2 = 0/8$

NWR	NER	NBR	میانگین جواب‌های الگوریتم IGA				
			شایستگی	هزینه	CO <sub>2</sub>		
۰	۳۱	۵	-/۹۱۶۵	۲۹۲۳۹/۹۷۲۲	۵۷۱۲۲۷۸/۵۲۷۸	۱۰	تعداد فعالیت‌ها
۱	۲۸	۷	-/۹۱۱۷	۹۲۱۸۲/۶۳۸۹	۱۷۲۳۳۱۴۵/۵	۳۰	
۱۰	۲۱	۵	-/۹۰۷۷	۱۵۴۱۶۱/۱۹۴۴	۲۸۸۲۰۴۳۳/۵۵۵۵۶	۵۰	
۰	۳۵	۱	-/۹۱۰۷	۹۸۹۵۷/۳۶۱۱	۱۹۴۶۸۲۴۰/۲۵	۲	تعداد روش‌های انجام فعالیت‌ها
۱	۳۰	۵	-/۹۱۳۳۹۰	۹۲۰۵۲/۷۲۲۲	۱۶۷۸۷۶۷۰/۵۸۳۳	۴	
۱۰	۱۵	۱۱	-/۹۱۱۳	۸۴۵۷۳/۷۲۲۲	۱۵۵۰۹۹۴۶/۷۵	۶	
۵	۲۶	۵	-/۹۱۲۸	۹۱۳۰۶/۱۹۴۴	۱۷۲۳۶۲۶۶	[۱-۱۰]	زمان انجام فعالیت‌ها
۴	۲۸	۴	-/۹۱۰۷	۹۱۱۶۴/۴۴۴۴	۱۷۲۹۷۹۲۰/۵۸	[۱۰-۴۰]	
۲	۲۶	۸	-/۹۱۲۳	۹۳۱۱۳/۱۶۶۷	۱۷۲۳۱۶۷۱	[۴۰-۱۰۰]	
۴	۴۱	۹	-/۹۱۰۸	۹۲۹۶۱/۸۵۱۹	۱۷۳۴۰۲۸۴/۴۶۳۰	P۰/۹	بازه کل انجام پروژه
۷	۳۹	۸	-/۹۱۳۱	۹۰۷۶۰/۶۸۵۲	۱۷۱۷۰۲۸۷/۲۵۹۳	P۰/۸	
۱۱	۸۰	۱۷	-/۹۱۲۰	۹۱۸۶۱/۲۶۸۵	۱۷۲۵۵۲۸۵/۸۶۱۱	حالات کلی	

NWR	NER	NBR	میانگین جواب‌های الگوریتم ژنتیک کلاسیک				
			شایستگی	هزینه	CO <sub>2</sub>		
۰	۳۱	۵	-/۹۱۴۳	۲۸۹۹۲/۹۷۲۲	۵۷۲۶۶۷۳/۰۸۳۳۳	۱۰	تعداد فعالیت‌ها
۱	۲۸	۷	-/۹۱۱۵	۹۱۸۲۸/۶۱۱۱	۱۷۲۴۴۶۶۶/۷۵	۳۰	
۱۰	۲۱	۵	-/۹۰۸۴	۱۵۴۳۰۰/۲۵	۲۸۷۹۷۱۹۴/۵۲۷۸	۵۰	
۰	۳۵	۱	-/۹۰۹۸	۹۸۹۳۰/۷۵	۱۹۴۶۹۸۱۱/۸۰۵۶	۲	تعداد روش‌های انجام فعالیت‌ها
۱	۳۰	۵	-/۹۱۳۸۹۴	۹۲۰۸۴/۹۷۲۲	۱۶۷۸۶۳۷۳/۹۷۲۲	۴	
۱۰	۱۵	۱۱	-/۹۱۰۵	۸۴۱۰۶/۱۱۱۱	۱۵۵۱۲۳۴۸/۵۸۳۳	۶	
۵	۲۶	۵	-/۹۱۲۰	۹۱۱۲۵/۸۳۳۳	۱۷۲۳۱۹۷۳/۸۶۱۱	[۱-۱۰]	زمان انجام فعالیت‌ها
۴	۲۸	۴	-/۹۱۰۵	۹۱۰۹۱	۱۷۳۰۰۰۴/۲۷۷۸	[۱۰-۴۰]	
۲	۲۶	۸	-/۹۱۱۷	۹۲۹۰۵	۱۷۲۳۶۵۵۶/۲۲۲۲	[۴۰-۱۰۰]	
۴	۴۱	۹	-/۹۱۰۹	۹۲۶۵۹/۰۷۴۱	۱۷۳۴۰۷۱۶/۵	P۰/۹	بازه کل انجام پروژه
۷	۳۹	۸	-/۹۱۱۹	۹۰۷۵۵/۴۸۱۵	۱۷۱۷۱۶۳۹/۷۴۰۷	P۰/۸	
۱۱	۸۰	۱۷	-/۹۱۱۴	۹۱۷۰۷/۲۷۷۸	۱۷۲۵۶۱۷۸/۱۲۰۴	حالات کلی	

جدول ۴. مقایسه نتایج با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک کلاسیک و IGA در حالت  $W_1 = 0/8$  و  $W_2 = 0/2$

NWR	NER	NBR	میانگین جواب‌های الگوریتم IGA				
			شایستگی	هزینه	CO <sub>2</sub>		
۱	۳۱	۴	-/۹۲۲۳	۱۵۹۶۸/۵	۶۸۸۴۷۱۹/۳۶۱۱	۱۰	تعداد فعالیت‌ها
۴	۲۶	۶	-/۹۱۰۶	۵۰۲۰۳/۹۷۲۲	۲۱۱۰۳۹۹/۴۱۶۷	۳۰	
۵	۲۵	۶	-/۹۱۱۲	۸۳۲۲۱/۲۷۷۸	۲۵۰۵۳۲۵۵/۰۲۷۸	۵۰	
۰	۳۶	۰	-/۹۱۲۸	۷۲۴۸۸/۰۲۷۸	۲۱۸۰۱۲۴۲/۵۵۵۶	۲	تعداد روش‌های انجام فعالیت‌ها
۲	۳۰	۴	-/۹۱۷۰	۴۴۳۸۵/۴۷۲۲	۲۰۹۴۸۲۹۴/۲۷۷۸	۴	
۸	۱۶	۱۲	-/۹۱۴۳	۳۲۵۲۰/۲۵	۲۰۲۹۲۴۲۷/۹۷۲۲	۶	
۲	۲۸	۶	-/۹۱۴۹	۴۹۵۷۰/۴۱۶۷	۲۱۱۱۶۵۵/۲۲۲۲	[۱-۱۰]	زمان انجام فعالیت‌ها
۶	۲۷	۳	-/۹۱۱۴	۴۹۴۱۹/۸۳۳۳	۲۱۰۷۷۷۹۶/۶۶۶۷	[۱۰-۴۰]	
۲	۲۷	۷	-/۹۱۷۸	۵۰۴۰۳/۵	۲۰۸۴۷۶۱۷/۹۱۶۷	[۴۰-۱۰۰]	
۶	۳۹	۹	-/۹۱۷۵	۴۹۰۴۲/۶۸۵۲	۲۰۷۹۱۳۳۷/۰۷۴۱	P۰/۹	بازه کل انجام پروژه
۴	۴۳	۷	-/۹۱۱۹	۵۰۵۵۳/۱۴۸۱	۲۱۲۳۶۲۳۹/۴۶۳۰	P۰/۸	
۱۰	۸۲	۱۶	-/۹۱۴۷	۴۹۷۹۷/۹۱۶۷	۲۱۰۱۳۹۸۸/۲۶۸۵	حالات کلی	

NWR	NER	NBR	میانگین جواب‌های الگوریتم ژنتیک کلاسیک				
			شایستگی	هزینه	CO <sub>2</sub>		
۱	۳۱	۴	-/۹۲۱۷	۱۵۹۴۵/۶۹۴۴	۶۹۰۹۶۷۱/۳۳۳۳	۱۰	تعداد فعالیت‌ها
۴	۲۶	۶	-/۹۱۰۹	۵۰۰۳۶/۹۴۴۴	۲۱۱۵۰۱۴۷/۶۳۸۹	۳۰	
۵	۲۵	۶	-/۹۱۱۱	۸۳۱۹۶/۲۲۲۲	۳۵۰۶۷۸۳۳	۵۰	
۰	۳۶	۰	-/۹۱۲۸	۷۲۴۸۸/۰۲۷۸	۲۱۸۰۱۲۴۲/۵۵۵۶	۲	تعداد روش‌های انجام فعالیت‌ها
۲	۳۰	۴	-/۹۱۶۹	۴۴۴۰۳/۱۱۱۱	۲۰۹۵۰۰۵۶/۰۸۳۳	۴	
۸	۱۶	۱۲	-/۹۱۴۰	۳۲۲۸۷/۷۲۲۲	۲۰۳۷۶۳۵۳/۳۳۳۳	۶	
۲	۲۸	۶	-/۹۱۴۷	۴۹۴۹۳/۳۸۸۹	۲۱۱۴۵۳۰۶/۶۱۱۱	[۱-۱۰]	زمان انجام فعالیت‌ها
۶	۲۷	۳	-/۹۱۲۳	۴۹۲۴۸/۸۶۱۱	۲۱۱۰۶۸۹۵/۱۱۱۱	[۱۰-۴۰]	
۲	۲۷	۷	-/۹۱۶۶	۵۰۴۳۶/۶۱۱۱	۲۰۸۷۵۴۵۰/۲۵	[۴۰-۱۰۰]	
۶	۳۹	۹	-/۹۱۷۱	۴۸۹۹۵/۳۷۰۴	۲۰۸۲۸۱۹۹/۷۲۲۲	P۰/۹	بازه کل انجام پروژه
۴	۴۳	۷	-/۹۱۲۱	۵۰۴۵۷/۲۰۳۷	۲۱۲۵۶۹۰/۱۵۹۲۶	P۰/۸	
۱۰	۸۲	۱۶	-/۹۱۴۶	۴۹۷۲۶/۲۸۷۰	۲۱۰۴۲۵۵۰/۶۵۷۴	حالات کلی	

در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که جواب‌های به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، در مسائل کوچک (با ۱۰ فعالیت) در مقایسه با مسائل بزرگ و متوسط بهتر است و بیشترین میزان اختلاف در این حالت دیده می‌شود. در هر سه حالت، مقدار شاخص NBR از مقدار NWR بیشتر است و در اغلب موارد با افزایش فضای جواب (افزایش تعداد فعالیت‌ها یا تعداد روش‌های انجام هر فعالیت) مقدار اختلاف این دو شاخص، افزایش یافته است.

همان‌طور که در جدول‌های نتایج مشاهده می‌شود، مقدار تابع شایستگی که با استفاده از هر دو الگوریتم به‌دست آمده است، مقداری بیش از  $0/9$  (نزدیک به کران بالای تعریف‌شده برای تابع شایستگی) دارد و این جواب از عملکرد خوب هر دو الگوریتم حکایت می‌کند، اما باید به این مسئله توجه شود که در اغلب افزایندهای صورت‌گرفته (از نظر تعداد فعالیت‌ها، تعداد روش‌های انجام فعالیت‌ها، زمان کل انجام پروژه و زمان انجام فعالیت‌ها) میانگین تابع شایستگی به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم IGA، از الگوریتم ژنتیک کلاسیک مقدار بیشتری دارد و با توجه به این نتیجه و در نظر گرفتن آنچه در بالا بیان شد، نتایج به‌دست‌آمده، حاکی از برتری الگوریتم IGA بر الگوریتم ژنتیک کلاسیک است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

سیستم‌های پشتیبانی تصمیم در اتخاذ تصمیم‌های کارا و اثربخش برای مدیران، نقش مهمی دارند. این پژوهش به ارائه سیستم پشتیبانی تصمیمی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به‌منظور موازنه هزینه - انتشار دی‌اکسیدکربن در حالت گسسته با در نظر گرفتن حد بالا برای زمان کل انجام پروژه و روش‌های مختلف برای انجام فعالیت‌ها پرداخته است. این مسئله تاکنون در ادبیات موضوع بررسی نشده است.

مسئله موازنه زمان - هزینه، از جمله مسائل مهم در حوزه کنترل پروژه به‌شمار می‌رود و در سال‌های اخیر توجه محققان بسیاری را جلب کرده است. در اغلب تحقیقات صورت‌گرفته در این حوزه، توابع هدف مد نظر پژوهشگران تنها زمان و هزینه بوده است؛ حال آنکه در مرحله برنامه‌ریزی پروژه‌ها، مدیران باید به شاخص‌های مهم دیگری نیز توجه کنند. از جمله این شاخص‌ها، آثار زیست‌محیطی پروژه‌ها است. مطالعات انجام‌شده در حوزه آثار زیست‌محیطی پروژه‌های ساخت، بیانگر سهم شایان توجه این پروژه‌ها در آلودگی محیط زیست کشورها است که با وجود آمارهای منتشرشده در این زمینه، همچنان سیستم تصمیم‌گیری کارا و مؤثری برای در نظر گرفتن این شاخص در برنامه‌ریزی پروژه‌ها وجود ندارد. در این راستا، مدل ریاضی هزینه

انتشار دی‌اکسید کربن گسسته‌ای با در نظر گرفتن حد بالا برای زمان کل انجام پروژه و روش‌های مختلف برای انجام فعالیت‌ها ارائه شده است.

در سیستم پشتیبانی تصمیم این پژوهش، الگوریتم ژنتیک جدیدی با عنوان IGA ارائه شده است که از نظریه گروه مرجع در جامعه‌شناسی استفاده می‌کند. به منظور اعتبارسنجی رویکرد جدید پژوهش حاضر، این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک کلاسیک مقایسه شده است و نتایج حاصل از محاسبه‌ها، نشان از برتری رویکرد پیشنهادی نسبت به الگوریتم ژنتیک کلاسیک دارد.

بررسی مسئله این پژوهش با در نظر گرفتن وضعیت غیرقطعی می‌تواند زمینه‌ای برای مطالعات آتی باشد. علاوه بر این، در نظر گرفتن توابع هدف دیگر به منظور جامعیت‌بخشیدن به مدل ارائه‌شده و استفاده از الگوریتم به کاررفته در این پژوهش برای سایر مسائل بهینه‌سازی، می‌تواند زمینه دیگری برای مطالعات آتی در نظر گرفته شود.

## References

- Acquaye, A. A. & Duffy, A. P. (2010). Input-output analysis of Irish construction sector greenhouse gas emissions. *Building and Environment*, 45 (3): 784-791.
- Agarwal, V., Upadhyay, R.K. & Pathak, B.K. (2013). A State of Art Review on Time Cost Trade off Problems in Project Scheduling. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, 2 (5): 36-43.
- Buchanan, A. H. & Honey, B. G. (1994). Energy and carbon dioxide implications of building construction. *Energy and Buildings*, 20 (3): 205-217.
- Calhoun, C. J. (2010). *Robert K. Merton: Sociology of Science and Sociology as Science*, New York: Columbia UP. ISBN 978-0-231-15112-2.
- Cole, R. J. (1999). Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. *Building and Environment*, 34 (3): 335-348.
- Dawson, E. M. & Chatman, E. A. (2001). Reference group theory with implications for information studies: a theoretical essay. *Information Research*, 6(3). Retrieved from <http://InformationR.net/6-3/paper105.html>.
- Dimoudi, A. & Tompa, C. (2008). Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2): 86-95.
- Ding, G.K.C. (2008). Sustainable construction-the role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, 86 (3): 451-464.

- EPA (2009). *Potential for reducing greenhouse gas emissions in the construction sector*, Washington D.C.: Environmental Protection Agency.
- Feng, C. W., Liu, L. & Burns, S. A. (1997). Using genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off problems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 11 (3):184-189.
- Goldberg, DE. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, M.A., USA: Addison-Wesley.
- González, M. J. & Navarro, J. G. (2006). Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: practical case study of three houses of low environmental impact, *Building and Environment*, 41 (7): 902-909.
- Holton, G. (2004). Robert K. Merton - Biographical Memoirs, *proceedings of the American philosophical society*, 148 (4): 505-517.
- Kalhor, Khanzadi, M., Eshtehardian, E. & Afshar, A. (2011). Stochastic time-cost optimization using non-dominated archiving ant colony approach. *Automation in Construction*, 20 (8): 1193-1203.
- Ke, H. & Ma, J. (2014). Modeling project time-cost trade off in fuzzy random environment. *Applied Soft Computing*, (19): 80-85.
- Ke, H. (2014). A genetic algorithm-based optimizing approach for project time-cost trade-off with uncertain measure. *Journal of Uncertainty Analysis and Applications*, 2(1):8. DOI: 10.1186/2195-5468-2-8.
- Ke, H., Maa, W., Ni, Y. (2009). Optimization models and a GA-based algorithm for stochastic time-cost trade-off problem, *Applied Mathematics and Computation*, 215(1): 308-313.
- Klanšek, U. & Pšunder, M. (2012). MINLP optimization model for the nonlinear discrete time-cost trade-off problem. *Advances in Engineering Software*, 48 (1): 6-16.
- Lit, H. & Love, P. (1997). Using improved genetic algorithms to facilitate time-cost optimization. *journal of construction engineering and management*, 123 (3): 233-237.
- Liu, L., Burns, S.A. & Feng, C.W. (1995). Construction time-cost trade-off analysis using LP/IP hybrid method, *Journal of construction engineering and management*, 121 (4): 446-454.



- Liu, S., Tao, R. & Ming Tam, C. (2013). Optimizing cost and CO2 emission for construction projects using particle swarm optimization, *Habitat International*, 37 (1): 155-162.
- Mokhtari, H., Baradaran Kazemzadeh, R. & Salmasnia A. (2011). Time-Cost Tradeoff Analysis in Project Management: An Ant System Approach, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 58 (1): 36-43.
- Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Khaksar Fasaee, M. A. & Adamowski, J. (2014). A Novel Multi Criteria Decision Making Model for Optimizing Time-Cost-Quality Trade-off Problems in Construction Projects, *Expert Systems with Applications*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.032>.
- Nabipoor Afruzi, Roghanian, E., Najafi, A.A. & Mazinani, M. (2013). A multi-mode resource-constrained discrete time-cost tradeoff problem solving using an adjusted fuzzy dominance genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 20 (3): 931-944.
- Pathak, B. K. & Srivastava, S. (2014). Integrated Fuzzy-HMH for project uncertainties in time-cost tradeoff problem, *Applied Soft Computing*, 21: 320-329.
- Rahimi, M. & Iranmanesh, H. (2008). Multi Objective Particle Swarm Optimization for a Discrete Time, Cost and Quality Trade -off Problem, *World Applied Sciences Journal*, 4 (2): 270-276.
- Singh, G. & Ernst, A. T. (2011). Resource constraint scheduling with a fractional shared resource. *Operations Research Letters*, 39 (5): 363-368.
- Sonmez, R. & Bettemir, Ö. H. (2012). A hybrid genetic algorithm for the discrete time-cost trade-off problem. *Expert Systems with Applications*, 39 (13): 11428-11434.
- Tavana, M., Abtahi, A.R. & Khalili-Damghani, K. (2014). A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time-cost-quality trade-off project scheduling problems. *Expert Systems with Applications*, 41 (4): 1830-1846.
- Wuliang, P. & Chengen, W. (2009). A multi-mode resource-constrained discrete time-cost tradeoff problem and its genetic algorithm based solution. *International Journal of Project Management*, 27 (6): 600-609.
- Xu, J., Zheng, H., Zeng, Z., Wu, S. & Shen, M. (2012). Discrete time-cost-environment trade-off problem for large-scale construction systems with multiple modes under fuzzy uncertainty and its application to Jinping-II

Hydroelectric Project. *International Journal of Project Management*, 30 (8): 950-966.

Yan, H., Shen, Q., Fan, L.C.H., Wang, Y. & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Building and Environment*, 45 (4): 949-955.