ارایه روش حلی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای مسئله یکپارچه انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل

سید محمدرضا حسینی‌نسب*، دانش آموخته دکتری، دانشکده صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

سید نادر شتاب بوشهری، دانشیار، دانشکده صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

رقیه خرمنی نودهی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.hosseininasab@in.iut.ac.ir

دریافت:۱۳۹٤/۰۹/۱۵ – پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۵

چکیده

یکی از مهمترین مسائلی که متولیان حوزه حمل و نقل همواره درگیر آن هستند، انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری به منظور توسعه شبکه حمل و نقل است. البته با توجه به محدودیت‌های منابع در دست، اجرای پروژه‌های انتخاب شده مستلزم زمان‌بندی آن‌ها در طول افق برنامه‌ریزی می‌باشد. یکپارچه‌سازی انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌ها در قالب یک مدل، هر چند پیچیدگی حل مدل را افزایش می‌دهد اما صحت و دقت نتایج را نیز بالا می‌برد. در این مقاله، مدل یکپارچه انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل در قالب یک مسئله طراحی شبکه گسسته(DNDP) دو سطحی معرفی شده است. در این مدل برای هر یک از پروژه‌های پیشنهادی مدت زمان اجرا و میزان سرمایه‌گذاری سالیانه، در ابتدا به صورت دقیق مشخص نیست و با حل مدل مقادیر آن‌ها مشخص می‌شود. همچنین یک شاخص جدید به منظور ارزیابی پروژه‌ها با توجه به آستانه‌ی رضایتمندی استفاده‌کنندگان سیستم توسعه داده شده است که در ترکیب با شاخص "زمان سفر طی شده در شبکه"، تابع هدف سطح بالایی مدل را تشکیل می‌دهد. با توجه به پیچیدگی حل دقیق مدل و زمان‌فرسا بودن آن، یک الگوریتم ژنتیک برای حل مدل در مدت زمان منطقی ارایه شده است. همچنین جهت بهینه کردن مقادیر پارامترهای الگوریتم، روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی بکار برده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ارایه شده، سه مسئله نمونه بر مبنای شبکه‌ی حمل و نقل شهری سوفالز در مقیاس‌های مختلف تولید گردیده است و از الگوریتم ژنتیک و همچنین روش شمارش کامل برای حل آن‌ها استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که الگوریتم ژنتیک ارایه شده چه از جنبه کیفیت جواب و چه از جنبه زمان حل عملکرد قابل قبولی، به ویژه در مسائل بزرگ، داشته است.

واژه‌های کلیدی: برنامه ریزی حمل و نقل، انتخاب پروژه‌ها، زمان‌بندی پروژه‌ها، طراحی شبکه گسسته، الگوریتم ژنتیک، روش تاگوچی

۱- مقدمه

یکی از مسائل مطرح در حوزه حمل و نقل، اولویت‌بندی و انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل[1] (TIP) می‌باشد. این مسئله برای تصمیم‌گیرندگان حوزه حمل و نقل بسیار حائز اهمیت است. زیرا آن‌ها همواره پروژه‌های بالقوه بسیاری را در دست بررسی دارند که به دلیل وجود اهداف و محدودیت‌های مختلف، اولویت‌بندی و انتخاب آن‌ها با پیچیدگی روبرو می‌باشد. در صورتی که انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل با یک نگاه علمی و همه جانبه به مسئله انجام نپذیرد، چه بسا که وضعیت سیستم حمل و نقل نه تنها بهبودی نیابد بلکه با افول نیز مواجه گردد. نتیجه‌ی این افول می‌تواند مواردی از قبیل افزایش هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم (چه برای گردانندگان سیستم و چه برای استفاده کنندگان آن)، به خطر افتادن امنیت شهروندان،

---

* نویسنده مسئول

Archive of SID

www.SID.ir

افزایش نارضایتی اجتماعی و ... باشد. از این‌رو حساسیت سیستم حمل و نقل و تاثیر قابل توجه آن بر زندگی عموم مردم اقتضا می‌نماید که فرآیند برنامه‌ریزی و انتخاب پروژه در این حوزه با رعایت توجه و دقت کافی به انواع تاثیرات آن انجام پذیرد.

موضوع دیگری که در کنار انتخاب پروژه‌ها باید به آن توجه شود، زمان‌بندی پروژه‌های انتخابی است. به عبارت دیگر باید مشخص گردد که پروژه‌های انتخاب شده در چه زمانی از افق برنامه‌ریزی اجرا گردند. چه بسا محدودیت‌هایی نظیر محدودیت بودجه اجازه انجام همزمان تمام این پروژه‌ها را ندهد. در حالت کلی دو استراتژی جهت انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌ها می‌توان تصور نمود، یکی حل این دو مسئله به صورت مجزا و دیگری به صورت همزمان. در استراتژی اول، نخست در یک افق زمانی مشخص پروژه‌های حمل و نقل انتخاب می‌گردد، و سپس در یک مسئله دیگر پروژه‌های انتخاب شده زمان‌بندی می‌شوند. در استراتژی دوم، مسئله به شکلی مدل‌سازی می‌شود که همزمان پروژه‌ها انتخاب گردیده و زمان‌بندی شوند. استفاده از استراتژی دوم موجب می‌گردد که مدلسازی مسئله و همچنین حل آن نسبت به استراتژی اول پیچیده‌تر گردد. اما نتیجه حاصل از استراتژی دوم به دلایل مختلف از جمله موارد زیر دقیق‌تر از استراتژی اول است:

- اصلی‌ترین محدودیتی که در هنگام انتخاب پروژه‌ها باید مورد توجه قرار گیرد، محدودیت منابع در دسترس نظیر بودجه است. تنها وقتی می‌توان محدودیت منابع سالیانه را در مدل اعمال کرد که پروژه‌ها دارای بعد زمانی باشند، در غیر اینصورت تنها می‌توان مجموع منابع در دسترس در طول افق برنامه‌ریزی (و نه در سالیان مختلف) را در هنگام انتخاب پروژه‌ها منظور کرد که این امر باعث خواهد شد از دقت کار کاسته شود و لذا در حالت اخیر ممکن است پروژه‌هایی انتخاب شوند که اجرای آن‌ها در افق برنامه‌ریزی مسئله با در نظر گرفتن محدودیت منابع سالیانه، اساساً امکان‌ناپذیر باشد.
- در صورتی که بخواهیم در هنگام انتخاب پروژه‌ها، از دستیابی سیستم حمل و نقل به اهداف موردانتظار در بازه‌های کوتاه مدت و بلندمدت اطمینان حاصل نماییم، باید بدانیم که این پروژه‌ها در چه زمانی به بهره‌برداری خواهند رسید واین امر نیز منوط به زمان‌بندی پروژه‌ها در هنگام انتخاب آن‌ها می‌باشد.

از این‌رو اگر بتوان همزمان با انتخاب پروژه‌های حمل و نقل زمان‌بندی آن‌ها را نیز مشخص نمود، بسیار مطلوب‌تر خواهد بود. اما مشکلی که با در نظرگرفتن همزمان انتخاب و زمان‌بندی ایجاد می‌شود، بزرگ شدن مسئله تصمیم‌گیری است که حل آن را به مراتب دشوارتر می‌نماید. فرض کنید n خیابان جهت اضافه شدن به شبکه حمل و نقل کاندید شده باشند و دوره برنامه‌ریزی نیز شامل T سال باشد. اگر فقط بخواهیم مسئله انتخاب پروژه‌ها را به تنهایی مورد بررسی قرار دهیم تعداد کل حالات ممکن 2^n خواهد بود. اما اگر بخواهیم مسئله انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌ها را به صورت همزمان درنظر بگیریم، یعنی مشخص نماییم چه پروژه‌هایی و در چه زمانی انجام گردند آنگاه کل حالات ممکن $\left(2^n\right)^T$ خواهد بود که به مراتب بزرگتر می‌باشد.

به عنوان مثال فرض کنید $n=10$ و $T=5$ باشد. در صورتی که فقط انتخاب پروژه‌ها را بررسی نماییم تعداد حالات ممکن $2^{10}=1024$ مورد خواهد بود و در صورتی که انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌ها را به صورت همزمان درنظر بگیریم تعداد حالات ممکن $\left(2^{10}\right)^5=1024^5=1.12\times10^{15}$ می‌باشد یعنی حدود 10^{12} برابر بیشتر. البته هرچند به دلیل وجود محدودیت‌هایی نظیر محدودیت بودجه در مسئله تصمیم‌گیری بسیاری از این حالات امکان ناپذیر خواهد بود، اما از سوی دیگر به دلیل پدیده برپز[۲]، برای یافتن جواب بهینه باید تمامی حالات امکان پذیر را مورد ارزیابی قرار داد که این موضوع پیچیدگی حل مسئله انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌های حمل و نقل به صورت همزمان را آشکار می‌سازد.

هدف مقاله حاضر توسعه روشی برای حل مسئله یکپارچه انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل در یک مدت زمان منطقی می‌باشد. بدین منظور در بخش ۲ مروری بر فعالیت‌های پژوهشی قبلی مرتبط صورت پذیرفته است و در بخش ۳ مدل ریاضی مسئله موردنظر معرفی شده است. در بخش ٤ نیز روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مدل معرفی شده ارایه گردیده است و در بخش ٥ تعدادی مسائل نمونه تولید شده و روش حل ارایه شده برای حل آن‌ها بکار برده شده است. در نهایت در بخش ٦ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از پژوهش انجام یافته ارایه شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

۲- پیشینه تحقیق

مرور و بررسی فعالیت‌های انجام شده در ادبیات موضوع نشان می‌دهد که مطالعات بسیاری جهت حل مسئله انتخاب پروژه[۳] انجام پذیرفته است و در این راستا پژوهشگران مختلف رویکردهای متنوعی را بکار برده‌اند. برخی از این پژوهشگران مسائل انتخاب پروژه را به صورت عام مورد توجه قرار داده‌اند و برخی دیگر به صورت خاص برای حوزه‌هایی نظیر حمل و نقل، فناوری اطلاعات، تحقیق و توسعه و ... . حتی مسائل انتخاب پروژه در حوزه حمل و نقل نیز متنوع است. پروژه‌های فیزیکی حمل و نقل را می‌توان به دو دسته پروژه‌های زیربنایی ساخت[۴] (نظیر ساخت جاده، پل و ...) و پروژه‌های نگهداری و بهسازی[۵] تقسیم نمود. در هر یک از این دو حوزه مطالعات بسیاری در جهت ارزیابی و انتخاب پروژه‌ها صورت پذیرفته است. البته در این مقاله تمرکز اصلی بر روی فعالیت‌های انجام شده پیرامون انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل یا به عبارت دیگر پروژه‌های زیربنایی حمل و نقل می‌باشد.

به طور کلی، می‌توان عمده رویکردهای مورد استفاده جهت حل مسئله انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل را با توجه به نوع مدل کردن مسئله، و سپس حل آن، در سه دسته اصلی طبقه‌بندی نمود، که عبارتند از: تحلیل هزینه- فایده(CBA)، تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و مسئله طراحی شبکه گسسته (DNDP). در ادامه هر یک از این رویکردها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- تحلیل هزینه- فایده

در این رویکرد تلاش می‌شود تا کلیه معیارهای موردنظر اعم از اقتصادی و غیراقتصادی به یک معیار واحد (عموماً مقادیر پولی) تبدیل شده و در نهایت پروژه‌ها بر این اساس ارزیابی می‌شوند. بدین منظور روش‌های سنتی ارزش فعلی خالص (NPV)، بازگشت سرمایه (ROR)، جریان نقدی یکنواخت سالیانه، و نسبت منافع به مخارج به صورت گسترده جهت ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Teng and Tzeng, 1996). با وجود استفاده گسترده از CBA در ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل، این روش با محدودیت‌ها و انتقاداتی همراه است. از جمله اینکه تبدیل معیارهای ناملموس نظیر پیامدهای اجتماعی و محیط زیستی به مقادیر قابل اعتماد پولی کاری بسیار مشکل و بحث برانگیز است. از این‌رو، در استفاده از این روش همواره تمایل به درنظرگرفتن معیارهایی که اندازه‌گیری آن‌ها آسان است، وجود دارد (Iniestra and Gutiérrez, 2009). بنابراین به نظر می‌رسد CBA نمی‌تواند اثرات متنوع پروژه‌های حمل و نقل را به صورت مناسب درنظر گیرد. بر این اساس CBA را می‌توان بیشتر یک رویکرد جهت ارزیابی امکان‌سنجی اقتصادی پروژه‌ها دانست. شرح بیشتری از استفاده از این روش در مسائل سرمایه‌گذاری حمل و نقل را می‌توان در (Button and Pearman,1983) یافت.

۲-۲- تصمیم‌گیری چندمعیاره

در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، همزمان معیارها و یا اهداف متعددی درنظر گرفته شده و سپس سعی می‌گردد نتایج آن‌ها به نحوی با یکدیگر تلفیق گردیده و در نهایت گزینه‌های مرجح را انتخاب نمود. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته روش‌های تصمیم‌گیری چند مشخصه‌ای[۶] (MADM) و روش‌های تصمیم‌گیری چند هدفه[۷] (MODM) تقسیم‌بندی نمود. در دهه‌های اخیر استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل با رشد قابل توجهی در ادبیات موضوع همراه بوده است. بسیاری از نویسندگان مسئله انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل را به صورت یک مسئله MADM فرموله کرده و با استفاده از یک روش MADM به حل آن پرداخته‌اند. به عنوان نمونه مراجع (Shelton and Medina, 2010; Gerçek, Karpak and Kilinçaslan, 2004; Tsamboulas, 2007; Selih (et al.), 2008; Ziara (et al.), 2002; pan, 2008; Barfod, Salling and Leleur, 2011; Su, Cheng, and Lin, 2006;) از فرایند تحلیل سلسله مراتبی[۸] (AHP) و مراجع (رضایی و اصغرزاده، ۱۳۸۷; Ugwu (et al.), 2006; Joumard and Nicolas, 2010; Berechman and Paaswell, 2005;) از روش جمع وزنی ساده[۹] (SAW) جهت انتخاب پروژه‌ها بهره برده‌اند. نکته مهمی که در هنگام استفاده از روش‌های MADM جهت رتبه‌بندی پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل باید بدان توجه نمود اینکه بدلیل وجود وابستگی متقابل[۱۰] بین پروژه‌ها در یک شبکه حمل و نقل، پروژه‌ها نباید جداگانه از یکدیگر مدل شوند، بلکه در مدلسازی باید سبدهای پروژه و اثرات پروژه‌ها بر یکدیگر دیده شود. در روش‌های MADM نظیر AHP، ELECTRE، و PROMETHEE و سایر روش‌های رتبه‌بندی این امر میسر نمی‌باشد مگر اینکه یک رتبه‌بندی صریح از همه سبدهای ممکن

Archive of SID

www.SID.ir

ایجاد شود (Iniestra and Gutiérrez, 2009). به عبارت دیگر با فرض وجود وابستگی متقابل پروژه‌ها، به شرطی می‌توان از روش‌های MADM استفاده نمود که گزینه‌های مسئله، سبدهای پروژه باشند و نه پروژه‌های جداگانه. لازم به ذکر است که هیچ یک از مراجع اشاره شده در بالا، وابستگی متقابل پروژه‌ها را درنظر نگرفته‌اند و لذا نتایج آن‌ها به شرطی معتبر خواهد بود که هدف انتخاب تنها یک پروژه باشد و نه مجموعه‌ای از پروژه‌ها.

برخی دیگر از نویسندگان، مسئله انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل و نقل را به صورت یک مسئله MODM فرموله کرده و سپس به حل آن پرداخته‌اند. تِنگ و تی‌زِنگ(Teng and Tzeng, 1996) مسئله مورد اشاره را به صورت یک مسئله کوله پشتی چندهدفه ۰ و ۱ [11] فرموله کرده‌اند. تِنگ و تی‌زِنگ (Teng and Tzeng, 1998) کار قبلی خود را توسعه داده و مفهوم فازی را وارد مدل نموده‌اند. اینسترا و گویترز (Iniestra and Gutiérrez, 2009) نیز با ایده گرفتن از (Teng and Tzeng, 1996) مسئله انتخاب پروژه‌های حمل و نقل را به صورت یک مسئله کوله پشتی چندهدفه ۰ و ۱ با تعدادی محدودیت اضافی مدلسازی نموده‌اند. در هر سه مرجع اشاره شده، محدودیت بودجه در دسترس در محدودیت‌های مدل و همچنین وابستگی متقابل پروژه‌های حمل و نقل با ایجاد تغییراتی در توابع هدف لحاظ گردیده است.

۲-۳- مسئله طراحی شبکه گسسته

مسئله طراحی شبکه گسسته[12](*DNDP*) در ارتباط با اضافه کردن کمان‌های جدید به شبکه موجود یا تعریض کمان‌های موجود به منظور بهینه کردن برخی اهداف مشخص (نظیر کمینه کردن مجموع زمان سفر در شبکه) با درنظرگرفتن محدودیت‌های موجود (از جمله محدودیت بودجه یا سرمایه) می‌باشد. با توجه به اینکه ظرفیت کمان‌ها در مسئله *DNDP* تنها می‌تواند مجموعه‌ای از مقادیر مشخص را به خود بگیرد، از این‌رو مسئله انتخاب پروژه‌های سرمایه گذاری حمل و نقل را می‌توان نمونه‌ای از مسائل طراحی شبکه گسسته دانست. از نقطه نظر بهینه‌سازی، *DNDP* یک مسئله تصمیم‌گیری دو سطحی است که تصمیم‌گیری در سطح بالایی توسط طراحان سیستم(شبکه) و در سطح پایینی توسط استفاده کنندگان سیستم انجام می‌پذیرد. تصمیم‌گیری طراحان سیستم در خصوص پیکره‌بندی شبکه با هدف بهبود عملکرد سیستم می‌باشد و در مقابل استفاده کنندگان شبکه مسیرهای سفر خود را در پاسخ به تصمیم اخذ شده در سطح بالایی انتخاب می‌کنند. از آنجا که فرض می‌شود استفاده کنندگان انتخاب‌های خود را با هدف بیشینه کردن توابع مطلوبیت فردی خود انجام می‌دهند، انتخاب‌های آنان لزوماً هماهنگ با تصمیماتی که برای طراحان سیستم بهینه است، نمی‌باشد.

مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی حتی در شکل خطی آن یک مسئله *NP-hard* است. مطالعات قبلی صورت گرفته پیرامون مسئله *NDP* نشان می‌دهد که حل این مسئله حتی در مقیاس کوچک بسیار مشکل است. به دلیل پیچیدگی ذاتی، *NDP* به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل در حوزه حمل و نقل تشخیص داده شده است و از این‌رو تبدیل به یک موضوع جذاب برای پژوهشگران این حوزه در چند دهه اخیر شده است. پژوهشگران برای حل مسئله پیچیده *DNDP* طیف وسیعی از رویکردها را با توجه به دقت و سرعت دستیابی به جواب مورد استفاده قرار داده‌اند که در (Poorzahedy and Rouhani, 2007) مروری بر این فعالیت‌ها صورت گرفته است.

۲-٤- زمان‌بندی پروژه‌های حمل و نقل

در میان فعالیت‌های انجام گرفته برای انتخاب پروژه‌های زیربنایی حمل و نقل، به ندرت زمان‌بندی پروژه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. ونگ و کیو (Weng and Qu, 2007) مدلی را برای زمان‌بندی ساخت جاده‌ها ارائه داده‌اند. در این مدل فرض بر این است که تعدادی از جاده‌ها جهت ساخت، از قبل تعیین شده است، و هدف تعیین زمان ساخت این پروژه‌ها در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی است. آن‌ها مسئله را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی تک هدفه با درنظرگرفتن محدودیت بودجه مدلسازی نموده‌اند که تابع هدف بیشینه‌سازی سود حاصل از کاهش مسافت‌های بین مبادی و مقاصد شبکه به واسطه احداث جاده‌های موردنظر می‌باشد. به دلیل پیچیدگی مدل، آن‌ها یک روش ابتکاری را برای حل مدل ارائه داده‌اند. فرض دیگر در مطالعه یاد شده آن است که مدت زمان موردنیاز برای ساخت هر یک از جاده‌ها برابر یک دوره برنامه‌ریزی می‌باشد. (Kim, Kim and Song, 2008) تنها مطالعه‌ای است که انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌ها را همزمان در قالب یک مسئله *DNDP* مدلسازی نموده است. در این مرجع فرض شده است که تعدادی خیابان جهت اضافه شدن به شبکه کاندیدا شده‌اند

به صورتی که ظرفیت، مدت زمان ساخت، و هزینه ساخت آن‌ها در هر سال از قبل مشخص است. هدف این مقاله تعیین آن است که چه خیابان‌هایی در چه سال‌هایی از افق برنامه‌ریزی به شبکه موجود اضافه شود به گونه‌ای که مجموع کل زمان سفر در افق برنامه‌ریزی حداقل گردد. پس از مدلسازی مسئله، یک الگوریتم *SA* و یک الگوریتم *GA* برای حل مسئله موردنظر ارائه شده است.

نکته‌ای که باید در هنگام زمان‌بندی پروژه‌ها بدان توجه کرد این است که مدت زمانی که یک پروژه به طول می‌انجامد از یک سو وابسته به محدودیت‌های فنی است، و از سوی دیگر وابسته به نحوه تخصیص بودجه به آن. لذا فرض ثابت بودن مدت زمان اجرای پروژه به عنوان یکی از پارامترهای ورودی مسئله، همانگونه که در دو مطالعه اشاره شده بالا فرض گردیده است، یک فرض واقعی نمی‌باشد و موجب می‌گردد انعطاف مدل کاهش یابد. از این‌رو در مدل معرفی شده در این مقاله، مدت زمان اجرای هر پروژه و میزان سرمایه‌گذاری سالیانه بر روی هر یک از پروژه‌ها جزو مجهولات مسئله فرض گردیده است که با حل مدل مقادیر آن‌ها مشخص می‌شود.

۳- معرفی مدل

همانگونه که پیش از این نیز اشاره شد، مسئله انتخاب پروژه‌های حمل و نقل یک مسئله *DNDP* است. مسئله یکپارچه انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌ها را می‌توان در قالب یک مسئله *DNDP* دوسطحی به صورت زیر مدلسازی نمود. ویژگی اصلی این مدل که آن را از سایر مدل‌های مشابه متمایز می‌نماید، نحوه مدلسازی زمان‌بندی پروژه‌هاست. در این مدل فرض گردیده است که زمان‌بندی یک پروژه از یک سو وابسته به محدودیت‌های فنی است که اجازه انجام پروژه را در مدت زمانی کمتر از یک مدت زمان حداقلی نمی‌دهد(رابطه (٤)) و از سوی دیگر وابسته به نحوه و میزان تخصیص بودجه به آن (روابط (۲) و (۳)) می‌باشد. همچنین در مدل فوق بین افق برنامه‌ریزی و افق ارزیابی تمایز گذاشته شده است. افق برنامه‌ریزی(T) افقی است که در طول آن پروژه‌ها جهت انجام، برنامه‌ریزی می‌گردند. اما افق ارزیابی(T') افقی است که اثرات و منافع پروژه‌ها در طول آن ارزیابی می‌گردد($T'>T$). از این‌رو در محاسبه تابع هدف از T' استفاده شده است. علت ایجاد این تمایز آن است که اثرات و منافع پروژه‌ها بهتر مشخص شود، زیرا در صورتی که افق برنامه‌ریزی و افق ارزیابی یکسان فرض گردند، آنگاه پروژه‌هایی که احداثشان در انتهای افق مشخص شده برنامه‌ریزی گردند، اثرات و منافعشان به خوبی در مدل منعکس نخواهد شد.

$$\underset{x,y}{Max}\ Z^U : f(v) = \sum_{t=1}^{T'} a_t f_t(v_t) \qquad (۱)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_2} c_{ij} y_t^{ij} \le B_t \qquad t = 1,2,...,T \qquad (۲)$$

$$\sum_{p=1}^{t} y_p^{ij} \ge x_t^{ij} \qquad t = 1,2,....,T \ ;\ (i,j)\in A_2 \qquad (۳)$$

$$y_t^{ij} \le \alpha_{ij} \qquad t = 1,2,....,T \ ;\ (i,j)\in A_2 \qquad (٤)$$

$$y_t^{ij} \ge 0 \qquad t = 1,2,....,T \ ;\ (i,j)\in A_2 \qquad (٥)$$

$$x_t^{ij} = 0 \text{or} 1 \qquad t = 1,2,....,T \ ;\ (i,j)\in A_2 \qquad (٦)$$

v_t is the solution of:

$$\underset{v_t}{Min}\ Z^L = \sum_{(i,j)\in A} \int_0^{v_t^{ij}} \tau_{ij}(\theta)\, d\theta \qquad (۷)$$

$$\sum_{j:(i,j)\in A} v_{st}^{ij} - \sum_{j:(j,i)\in A} v_{st}^{ji} = d_{st}^{i},\ \forall i \in N,\ \forall s \in D \qquad (۸)$$

$$v_t^{ij} = \sum_{s\in D} v_{st}^{ij},\quad \forall (i,j)\in A \qquad (۹)$$

$$v_t^{ij} \le M x_t^{ij},\quad \forall (i,j)\in A_2 \qquad (۱۰)$$

$$v_{st}^{ij} \ge 0,\quad \forall (i,j)\in A,\ \forall s \in D \qquad (۱۱)$$

که در آن:

G(N,A) شبکه حمل و نقل با مجموعه گره‌های N و مجموعه کمان‌های A. $N = O \cup D \cup R$، که O، D و R به ترتیب نشان‌دهنده مجموعه گره‌های مبدا، مجموعه گره‌های مقصد و مجموعه گره‌های عبوری می‌باشند. $A = A_1 \cup A_2$، که A_1 و A_2 به ترتیب نشان‌دهنده مجموعه کمان‌های موجود و مجموعه کمان‌های پیشنهادی جهت اضافه شدن به شبکه می‌باشند.

(i, j) جهت کمان، $(i,j)\in A$

(r, s) زوج‌های مبدا- مقصد که $r \in O$ و $s \in D$ به ترتیب گره‌های مبدا و مقصد هستند.

W مجموعه همه زوج‌های مبدا-مقصد، که $W \subseteq N \times N$

d_{st}^{r} تقاضا بین مبدا-مقصد $(r,s)\in W$ در دوره t، که فرض می‌شود یک ثابت غیرمنفی است.

v_{st}^{ij} جریان روی کمان $(i,j)\in A$ به مقصد s در زمان t

Archive of SID

www.SID.ir

v_t ماتریس v_t^{ij}ها با بعدی برابر $|A|\times|T'|$.

$\tau_{ij}(v_t^{ij})$ هزینه یا زمان سفر روی کمان $(i,j)\in A$ که به صورت یک تابع مثبت و پیوسته از v_t^{ij} تعریف می‌گردد.

t اندیس نشان دهنده شماره دوره $(t=1,2,...,T')$

$f(v)$ مقدار هدف به ازای مقادیر حجم جریان در شبکه(v)

$f_t(v_t)$ مقدار هدف در دوره t به ازای مقادیر حجم جریان در شبکه(v_t)

a_t ضریب اهمیت (وزنی) دوره t

c_{ij} بودجه موردنیاز برای احداث کمان(i,j)

B_t بودجه در دسترس در دوره t

x_t^{ij} متغیر صفر و یک که نشان‌دهنده بهره‌برداری یا عدم بهره‌برداری کمان (i,j) در دوره t می‌باشد

y_t^{ij} متغیر پیوسته بین صفر و یک که نشان‌دهنده سهم انجام پروژه کمان (i,j) در دوره t می‌باشد

x ماتریس x_t^{ij}ها با بعدی برابر با $|A_2|\times|T|$

y ماتریس y_t^{ij}ها با بعدی برابر با $|A_2|\times|T|$

α_{ij} حداکثرسهم قابل انجام پروژه کمان(i,j) در هر دوره $(0<\alpha_{ij}\leq 1)$.

T تعداد دوره زمانی در افق برنامه‌ریزی

T' تعداد دوره زمانی در افق ارزیابی

رابطه (۱) و(۵) به ترتیب نشان‌دهنده توابع هدف سطوح بالایی و پایینی می‌باشد. رابطه (۲) نشان‌دهنده محدودیت بودجه است. رابطه (۳) نشان‌دهنده ارتباط بین x_t^{ij}ها و y_t^{ij}ها بوده و بیانگر آن است که تا ساخت یک پروژه تکمیل نگردد $(\sum_{p=1}^{t} y_p^{ij}=1)$، امکان بهره‌برداری از آن وجود ندارد. رابطه (٤) حداکثر سهمی از هر پروژه که در هر دوره امکان ساخت آن وجود دارد را مشخص می‌نماید$(0<\alpha_{ij}\leq 1)$ که مقدار آن با توجه به محدودیت‌های فنی پروژه تعیین می‌شود. روابط (۷) تا (۱۱) بیانگر شرایط تعادل استفاده کننده، رابطه (۸) تضمین‌کننده بقاء جریان در گره‌ها، و رابطه (۹) نشان می‌دهد که جریان در هر کمان برابر با مجموع جریان‌های با مقاصد مختلف بر روی آن کمان است. رابطه (۱۰) از وجود جریان در کمان‌های احداث نشده جلوگیری می‌کند. در این رابطه M یک عدد مثبت بزرگ دلخواه می‌باشد. روابط (۵)، (٦) و نیز (۱۱) نشان‌دهنده نوع متغیرهای تصمیم می‌باشند. با توجه به نوع متغیرهای تصمیم، مدل ارایه شده یک مدل برنامه‌ریزی دو سطحی است که سطح بالایی آن مسئله برنامه‌ریزی صحیح آمیخته(*MIP*)[۱۳] و سطح پایینی آن مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی[۱٤] (*NLP*) می‌باشد.

تابع هدفی که اغلب برای مسئله *DNDP* درنظر گرفته می‌شود، کمینه‌سازی مجموع زمان سفر طی شده در شبکه است که برای مسئله فوق به صورت زیر قابل تعریف است.

$$f_1(v)=\sum_{t=1}^{T'} a_t \sum_{(i,j)\in A} v_t^{ij}\tau_{ij}(v_t^{ij}) \qquad (۱۲)$$

رابطه فوق هرچند شاخص خوبی برای سنجش وضعیت کلان شبکه است، اما هیچ اطلاعاتی را در خصوص جزئیات آنچه در شبکه اتفاق می‌افتد نشان نمی‌دهد. مثلاً نشان نمی‌دهد چه تعداد افراد از مدت زمان سفرهای خود راضی هستند و چه تعداد ناراضی. از اینرو در اینجا شاخصی جهت سنجش میزان نارضایتی استفاده‌کنندگان سیستم حمل‌ونقل از منظر زمان سفر تعریف می‌گردد که می‌تواند مکمل شاخص مجموع زمان سفر طی شده در شبکه باشد.

۳-۱- شاخص سنجش میزان نارضایتی استفاده‌کنندگان شبکه

با فرض اینکه θ_1 آستانه‌ی قابل قبولی برای افزایش زمان سفر برای استفاده‌کنندگان شبکه‌ی حمل‌ونقل نسبت به دوره‌ی قبل و θ_2 نیز آستانه‌ی قابل قبولی برای افزایش زمان سفر برای استفاده‌کنندگان شبکه‌ی حمل‌ونقل نسبت به دوره‌ی مبنا باشد، روابط (۱۳) و (١٤) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{SP_{rs}^{t}-SP_{rs}^{t-1}}{SP_{rs}^{t-1}} < \theta_1 \qquad \forall (r,s)\in W \qquad (۱۳)$$

$$\frac{SP_{rs}^{t}-SP_{rs}^{0}}{SP_{rs}^{0}} < \theta_2 \qquad \forall (r,s)\in W \qquad (۱٤)$$

در این روابط، SP_{rs}^{t} کوتاه‌ترین زمان سفر از مبدأ r به مقصد s در شبکه است که در دوره‌ی t محاسبه می‌شود. با توجه به این روابط اگر زمان سفر یک مبدأ-مقصد بیش از نرخ θ نسبت به دوره‌ی قبل افزایش یابد، موجب نارضایتی استفاده‌کنندگان آن مبدأ- مقصد می‌گردد. اگر فرض شود $z1_{rs}^{t}$ یک متغیر صفر و یک باشد، به طوری که اگر شرط (۱۳) برقرار

Archive of SID

www.SID.ir

باشد، مقدار آن ۱ و در غیر اینصورت، مقدار صفر را به خود می‌گیرد و $z2_{rs}^{t}$ نیز به صورت مشابه با توجه به رابطه‌ی (۱٤) تعریف شود، بنابر مدل سنجش نارضایتی پیشنهادی در این مقاله، تعداد افرادی که در طول افق ارزیابی به دلیل افزایش زمان سفر ناراضی شده‌اند با درنظر گرفتن ضریب اهمیت دوره ارزیابی، از رابطه‌ی (۱۵) به دست می‌آید.

$$f_2(v) = \sum_{t=1}^{T'} a_t \sum_{(r,s)\in W} dks_{rs}^{t}[1 - (0.5 * z1_{rs}^{t}) - (0.5 * z2_{rs}^{t})] \quad (۱۵)$$

در این رابطه، dks_{rs}^{t} تقاضای سفر از مبدأ r به مقصد s در دوره‌ی t است. از آنجایی که مقادیر $z1_{rs}^{t}$ و $z2_{rs}^{t}$ باید با هم ترکیب شوند، با فرض این که نارضایتی نسبت به دوره‌ی قبل دارای اهمیتی برابر با نارضایتی نسبت به دوره‌ی مبنا است، این دو مقدار با وزنی مساوی با هم جمع شده‌اند. این وزن‌ها در حالت کلی می‌توانند تغییر یابند.

۳-۲- تابع هدف پیشنهادی

برای اینکه هر دو شاخص معرفی شده در کنار هم در مدل بکارگرفته شوند، روش‌های متعددی وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از یک ترکیب خطی وزن‌دار از شاخص‌های مورد نظر می‌باشد. با توجه به این رویکرد می‌توان تابع هدف مسئله را به صورت رابطه‌ی (۱٦) نوشت.

$$f(v) = \sum_{k=1}^{2} \frac{w_k [f_k^b(v) - f_k(v)]}{f_k^b(v)} \quad (۱٦)$$

در این رابطه $f(v)$ تابع هدف مسئله است که باید بیشینه گردد. $f_k(v)$ مقدار شاخص kام و $f_k^b(v)$ مقدار شاخص kام برای شبکه مبناست. منظور از شبکه مبنا همان شبکه موجود در حالتی است که هیچ پروژه‌ای به آن اضافه نشده است. w_k نیز وزن مربوط به شاخص kام است که توسط مدیران و تصمیم‌گیرندگان شبکه حمل‌ونقل تعیین می‌شوند. همانگونه که در این رابطه مشاهده می‌شود، برای ترکیب شاخص‌ها در یک تابع خطی، از آنجا که مقیاس‌های سنجش شاخص‌های موردنظر متفاوت است، ابتدا مقادیر آن‌ها نرمال‌سازی می‌شود. مقادیر وزن شاخص‌ها نیز اغلب بگونه‌ای تعیین می‌شود، که مجموع آن‌ها برابر یک شود($w_1 + w_2 = 1$).

٤- معرفی روش حل

با توجه به پیچیدگی محاسبه‌ی تابع هدف و وجود پدیده‌ی بریز، ارایه‌ی روش‌های دقیق رایج نظیر شاخه و کران برای حل مدل معرفی شده در یک مدت زمان مناسب، بسیار پیچیده و دشوار است. از این‌رو، برای یافتن جواب دقیق این مسئله از روش شمارش کامل استفاده شده است.

بدین منظور جهت محاسبه جواب بهینه ابتدا تمامی حالات امکان‌پذیر مسئله تولید گردیده و سپس برای این جواب‌ها مقادیر تابع هدف از طریق حل مسئله‌ی تخصیص ترافیک (مسئله سطح پایین) محاسبه می‌شود و بهترین جواب به عنوان جواب بهینه معرفی می‌گردد. این روش به دلیل اینکه تمام جواب‌های ممکن را تولید می‌کند، نیازمند زمان زیادی برای ارایه‌ی نتایج در ابعاد بزرگ است. اما در ابعاد کوچک در زمان قابل قبولی، جواب بهینه را به دست می‌دهد. از این‌رو، برای ابعاد بزرگ استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است.

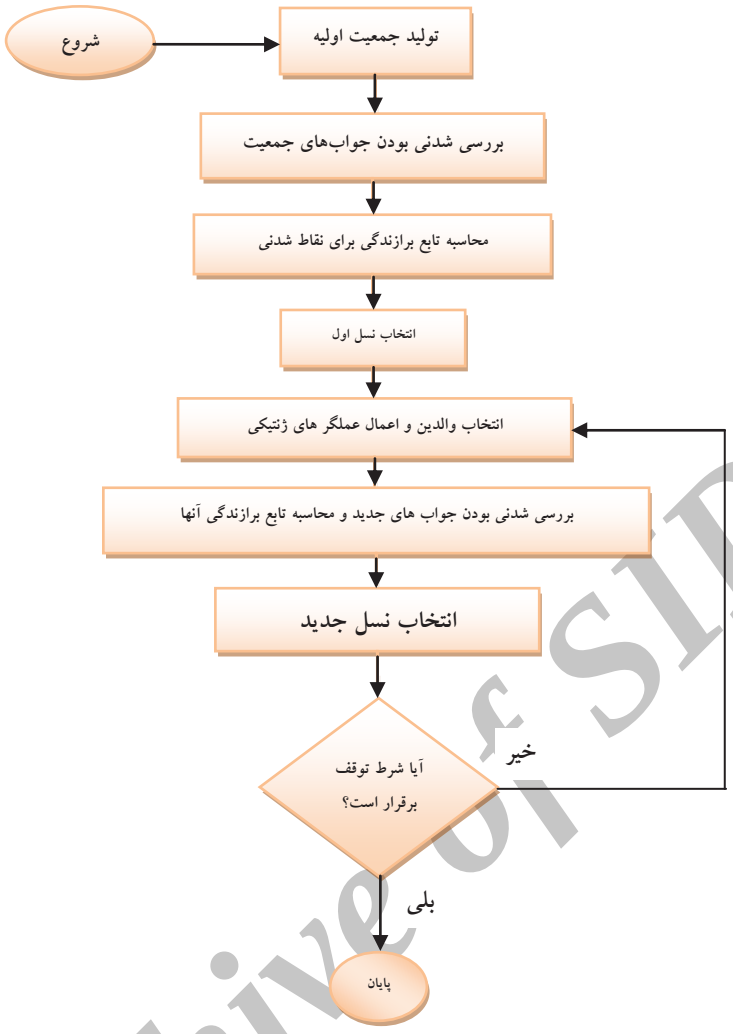
٤-۱- الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی، با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی، به نحو مؤثری، نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند. این روند باعث می‌شود که جستجوی فضا به بخشی از نواحی که متوسط آماری تابع هدف در آن‌ها زیاد بوده و امکان وجود نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق در آن‌ها بیشتر است، سوق پیدا کند. چون در این روش برخلاف روش‌های تک‌مسیری، فضای جواب به طور همه جانبه جستجو می‌شود، امکان کمتری برای همگرایی به یک نقطه‌ی بهینه‌ی محلی وجود خواهد داشت. امتیاز دیگری که این الگوریتم دارد این است که هیچ محدودیتی برای تابع بهینه‌شونده، مثل مشتق‌پذیری و پیوستگی ندارد. در روند جستجوی خود، تنها به تعیین مقدار تابع هدف در نقاط مختلف نیاز دارد و اطلاعات کمکی دیگری مثل مشتق تابع هدف را استفاده نمی‌کند. لذا می‌تواند در مسائل مختلف اعم از خطی، غیرخطی، پیوسته و گسسته استفاده شود و به سهولت با مسائل مختلف قابل تطبیق است.

در شکل ۱ مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مشخص شده است. در ادامه مشخصات الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله‌ی تعریف شده، معرفی می‌گردد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. روندنمای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسئله

- **شیوه‌ی نمایش جواب‌ها:** اولین گام برای استفاده از الگوریتم ژنتیک، تعیین نحوه‌ی تعریف کروموزوم‌هاست که این موضوع با توجه به ویژگی‌های مسئله تعیین می‌گردد. در الگوریتم پیشنهادی کروموزوم‌ها به صورت آرایه‌ای از اعداد صحیح تعریف می‌شود. طول این آرایه به اندازه‌ی تعداد پروژه‌های کاندید و مقدار هر آرایه، عدد صحیحی بین صفر و تعداد دوره‌ی برنامه‌ریزی است. وجود عدد صفر در یک آرایه بیانگر عدم انجام پروژه مربوطه در طول افق برنامه‌ریزی می‌باشد. در شکل ۲ نمونه‌ای از کروموزوم (جواب) ایجاد شده برای الگوریتم نشان داده شده است. کروموزوم نمایش داده شده در این شکل، برای مسئله‌ای با ۵ پروژه‌ی کاندید است که در آن پروژه‌ی اول در دوره‌ی سوم، پروژه‌ی سوم در دوره‌ی دوم و پروژه‌ی چهارم در دوره‌ی چهارم به بهره‌برداری می‌رسد و پروژه‌های دوم و پنجم اصلاً اجرا نمی‌شوند.

۳	۰	۲	٤	۰

شکل ۲. نحوه‌ی نمایش جواب برای اجرای الگوریتم

- **تولید جمعیت اولیه:** از آنجایی که الگوریتم ژنتیک، یکی از الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت می‌باشد، برای شروع این الگوریتم، باید تعدادی جواب اولیه تولید نمود. تولید این جواب‌ها می‌تواند به صورت کاملاً تصادفی و یا هدایت شده صورت پذیرد. از آنجا که در الگوریتم پیشنهادی جواب‌هایی که امکان‌ناپذیر هستند از مرحله ارزیابی کنار گذاشته می‌شوند، تولید کاملاً تصادفی جواب‌های اولیه می‌تواند موجب شود که بسیاری از جواب‌ها امکان ناپذیر گردیده و لذا جمعیت اولیه مناسبی ایجاد نگردد. در اینجا جمعیت

Archive of SID

www.SID.ir

اولیه به صورت هدفمند و هدایت شده تولید می‌گردند اما در عین حال به تصادفی بودن آن‌ها نیز توجه می‌شود. بدین منظور برای تولید هر یک از جواب‌های جمعیت اولیه ابتدا ژن‌هایی که در هر کروموزوم مقدار صفر می‌گیرند یا به عبارت دیگر پروژه‌هایی که انتخاب نمی‌گردند، تعیین می‌شوند. به این منظور، محدودیتی به صورت رابطه‌ی (۱۷) تعریف می‌شود.

$$\sum_{j=1}^{N} c_j < B \qquad (۱۷)$$

که در آن c_j هزینه ساخت پروژه jام می‌باشد. این محدودیت، نشان می‌دهد که آیا بودجه کافی برای اجرای پروژه‌ها وجود دارد یا خیر. اگر این محدودیت برقرار باشد، می‌توان به تمام ژن‌ها مقدار داد و اگر برقرار نباشد، به صورت تصادفی از ۱ تا N، عدد صحیحی انتخاب شده و مقدار ژن مربوط به این پروژه و همچنین c_j مربوط به آن صفر در نظر گرفته می‌شود و محدودیت فوق مجدداً بررسی می‌شود. این روند تا جایی که محدودیت فوق برقرار شود ادامه می‌یابد. در این مرحله جوابی به دست می‌آید که تعدادی از ژن‌ها مقدار صفر گرفته‌اند و تعدادی خالی هستند. پس از آن باید ژن‌های خالی با تعیین زمان بهره برداری پروژه‌ها مقداردهی شوند. زمان بهره برداری هر یک از این پروژه‌ها(U_j)، با استفاده از یک توزیع یکنواخت بین زودترین دوره ممکن جهت بهره‌برداری(S_j) تا آخرین دوره از افق برنامه‌ریزی(T) طبق روابط (۱۸) و (۱۹) انتخاب می‌شود.

$$S_j = \lceil \frac{1}{\alpha_j} \rceil \qquad (۱۸)$$

$$U_j = \text{Integer Random } [S_j \text{ , T}] \qquad (۱۹)$$

- **تولید جمعیت جدید:** برای تولید جمعیت جدید در هر نسل، مکانیزم انتخاب و عملگرهای تقاطع و جهش به شرح زیر استفاده شده است.

– مکانیزم انتخاب: در این الگوریتم برای انتخاب والدین به منظور شرکت در عملگرهای تقاطع و جهش، از روش چرخ رولت استفاده شده است که در آن احتمال انتخاب هر جواب متناسب با مقدار تابع برازش آن جواب می‌باشد.

– عملگر تقاطع: برای استفاده از این عملگر، ابتدا احتمال استفاده از آن تعیین می‌شود تا از این طریق تعداد موردنظر از جمعیت برای شرکت در عمل تقاطع انتخاب شوند. در الگوریتم پیشنهادی ترکیبی از سه نوع عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای، دونقطه‌ای و یکنواخت با احتمالات مختلف استفاده شده است.

– عملگر جهش: برای استفاده از این عملگر نیز ابتدا احتمال استفاده از آن تعیین می‌شود، سپس از میان جواب‌های تقاطع یافته، تعدادی از جواب‌ها برای جهش انتخاب می‌شوند. برای جهش، ژنی به تصادف انتخاب شده و از آنجا که مقدار آن صحیح است، عدد صحیحی به غیر از مقدار فعلی آن، از مجموعه‌ی اعداد صحیح امکان‌پذیر به منظور جایگزین شدن با مقدار فعلی انتخاب می‌شود.

- **تابع برازندگی:** مقدار تابع هدف مدل پیشنهادی، به عنوان تابع برازندگی در نظر گرفته شده است، لذا می‌بایست پس از ایجاد جمعیت اولیه و همچنین تولید جواب‌های جدید حاصل از عملگرها، مقدار تابع هدف را برای این جواب‌ها محاسبه نمود.
- **انتخاب نسل جدید:** برای انتخاب هر نسل از جواب‌ها، ترکیبی از نخبه‌گرایی و انتخاب تصادفی استفاده شده است به صورتی که درصد بیشتری از نسل جدید از بین بهترین جواب‌های نسل قبل و جواب‌های تولید شده توسط عملگرهای تقاطع و جهش و درصد کمی از آن به صورت تصادفی از باقی جواب‌ها انتخاب می‌شود.
- **شرط توقف:** در الگوریتم ژنتیک، از آنجایی که جواب بهینه لزوماً از قبل مشخص نیست، برای اتمام روند الگوریتم باید شروطی را تعیین نمود تا با بررسی آن، اجرای الگوریتم خاتمه یابد. شرط توقف در الگوریتم پیشنهادی، انجام تعداد مشخصی تکرار یا سپری شدن تعداد معینی تکرار بدون هیچ‌گونه بهبود در مقدار هدف در نظر گرفته شده است.

٤-۲- تنظیم پارامترهای GA

یکی از موضوعاتی که در عملکرد GA بسیار تاثیرگذار است، تنظیم صحیح پارامترهای الگوریتم است. در مقاله حاضر جهت انتخاب پارامترهای بهینه الگوریتم از طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی[۱۵] استفاده شده است. روش تاگوچی روشی است که با استفاده از آرایه‌ی متعامد، با تعداد معینی آزمایش، میزان

Archive of SID

www.SID.ir

تاثیر عوامل و سطوح بهینه‌ی مطالعات تجربی پیش‌بینی می‌شود. طرح‌های آرایه‌ی متعامد استاندارد تاگوچی با تعداد داده‌های نسبتاً کم، در برآورد نقطه‌ی بهینه و اثرات عوامل، بسیار پرکاربرد است. این روش، در مواردی که تعداد پارامترها و سطوح مربوط به آن‌ها زیاد است، کارایی خود را نسبت به روش فاکتوریلی کامل نشان می‌دهد. برای مثال اگر طرح فاکتوریلی کامل برای ٦ پارامتر سه سطحی مورد استفاده قرار بگیرد، تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز برای آن ۷۲۹ ($۳^٦$ =) مورد است در حالی که تعداد کل آزمایش‌ها در روش تاگوچی، به ۱۸ مورد (آرایه‌ی متعامد هجده سطری L18) کاهش می‌یابد. گام‌های روش تاگوچی به صورت زیر است:

گام۱) عوامل کیفی مورد بررسی مشخص شود.

گام۲) سطوح مختلف هر یک از عوامل تعریف گردد.

گام۳) آرایه مناسب انتخاب گردد.

گام٤) آزمایش‌ها طبق آرایه اجرا شود.

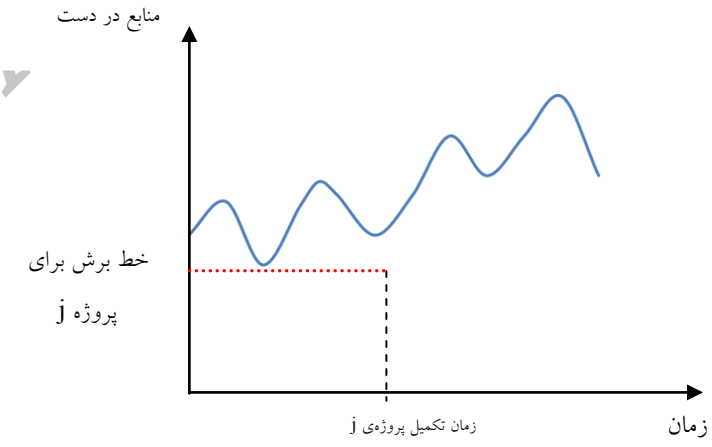
گام۵) نتایج آزمایش به نسبت S/N تبدیل و سطح بهینه هر عامل پیدا شود.

گام ٦) آزمایش‌ها، طبق سطوح بهینه اجرا گردد.

٤-۳- روش ابتکاری جهت امکان‌سنجی جواب‌ها

همانگونه که در روابط (۲) تا (٦) نیز قابل مشاهده است، جهت امکان‌پذیری یک جواب می‌بایست مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری x_t^{ij} و y_t^{ij} مربوط به آن مشخص باشد. این در حالی است که بر اساس شیوه نمایش جواب‌ها در الگوریتم پیشنهادی تنها مقادیر x_t^{ij} قابل تشخیص است. لذا این سوال پیش می‌آید که چگونه می‌توان امکان‌پذیری یک جواب تولیدی مطابق با شیوه بیان شده را تشخیص داد؟ به عبارت دیگر چگونه می‌توان تشخیص داد که به ازای مقادیر مشخصی از x_t^{ij} آیا y_t^{ij} هایی وجود خواهد داشت که در محدودیت‌های مسئله صدق کند؟ برای پاسخ به این پرسش یک الگوریتم ابتکاری به شرح زیر توسعه داده شده است:

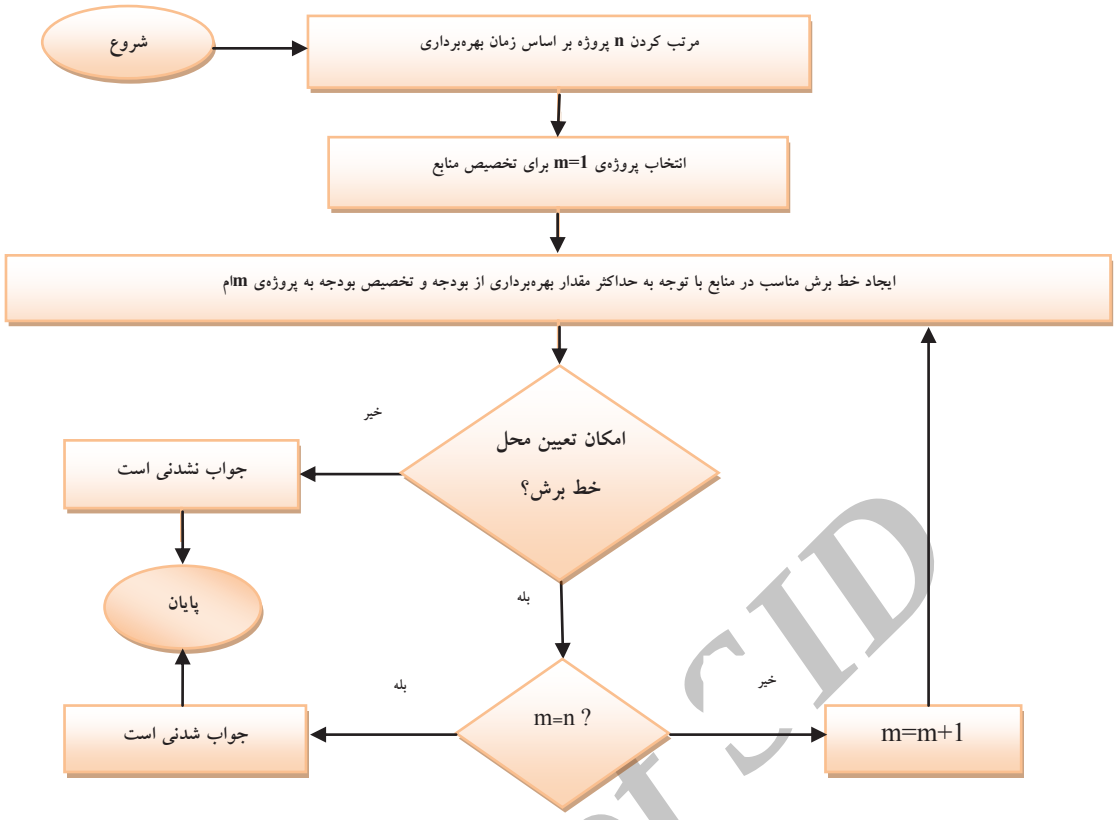
ابتدا پروژه‌ها بر اساس زمان بهره‌برداری به طور صعودی مرتب می‌شوند. روند تخصیص از اولین پروژه آغاز می‌شود و به گونه‌ای از منابع به آن تخصیص داده می‌شود که برای پروژه‌ی بعدی بهترین حالت برای استفاده از منابع وجود داشته باشد. این روش مشابه روش تسطیح منابع در مسائل کنترل پروژه است. اگر فرض کنیم که منابع در دسترس در طول زمان همچون شکل ۳ باشد، برای هر پروژه باید بالاترین محل خط برشی را تعیین کرد که کل منابع موردنیاز آن پروژه از محل منابع قرارگرفته در بالای این خط، با رعایت حداکثر سهم قابل انجام پروژه، قابل تخصیص باشد. پس از تعیین محل خط برش و تخصیص منابع به پروژه موردنظر، منابع در دست بروزرسانی و نمودار جدید ترسیم می‌گردد. سپس این کار مجدداً برای پروژه بعدی تکرار می‌شود. اگر در مرحله‌ای نتوان چنین خط برشی را تعیین کرد به این معنا خواهد بود که جواب موردنظر یک جواب امکان‌پذیر نمی‌باشد. روندنمای روش ابتکاری ارایه شده در شکل ٤ آمده است.



شکل ۳. نمایی از منابع در دسترس و محل خط برش

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ٤. روندنمای روش پیشنهادی جهت امکان سنجی جواب‌ها

۵- مسائل نمونه و نتایج

با توجه به اینکه مدل ارایه شده مربوط به یک شبکه‌ی حمل‌ونقل شهری است، نیازمند این است که روی شبکه‌ی شهری مناسب، اجرا و پیاده‌سازی شود. ازآنجایی که حل مدل این مسئله برای انتخاب پروژه در یک شبکه‌ی خیابانی واقعی، بسیار زمان‌فرساست، از شبکه‌ی سوفالز[16] استفاده شده است. شبکه‌ی سوفالز، شبکه‌ای است با ٢٤ گره و ٧٦ کمان که در مجموع ٥٧٦ زوج مبدأ- مقصد دارد. نمایی از این شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است. این شبکه‌ی خیابانی به عنوان شبکه‌ای آزمایشی در بسیاری از پژوهش‌های حمل‌ونقلی مورد استفاده قرار گرفته است و جزء شبکه‌های خیابانی با اندازه‌ی متوسط در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به مشخصه‌های کمان‌ها و ماتریس تقاضای مبدأ- مقصد برای این شبکه از مقاله‌ی (Yang and Zhou ,1998) استخراج شده است. همچنین فرض شده است در هر سال به صورت کاملاً تصادفی بین ۰ تا ۵ درصد به مقادیر ماتریس تقاضا اضافه می‌گردد.

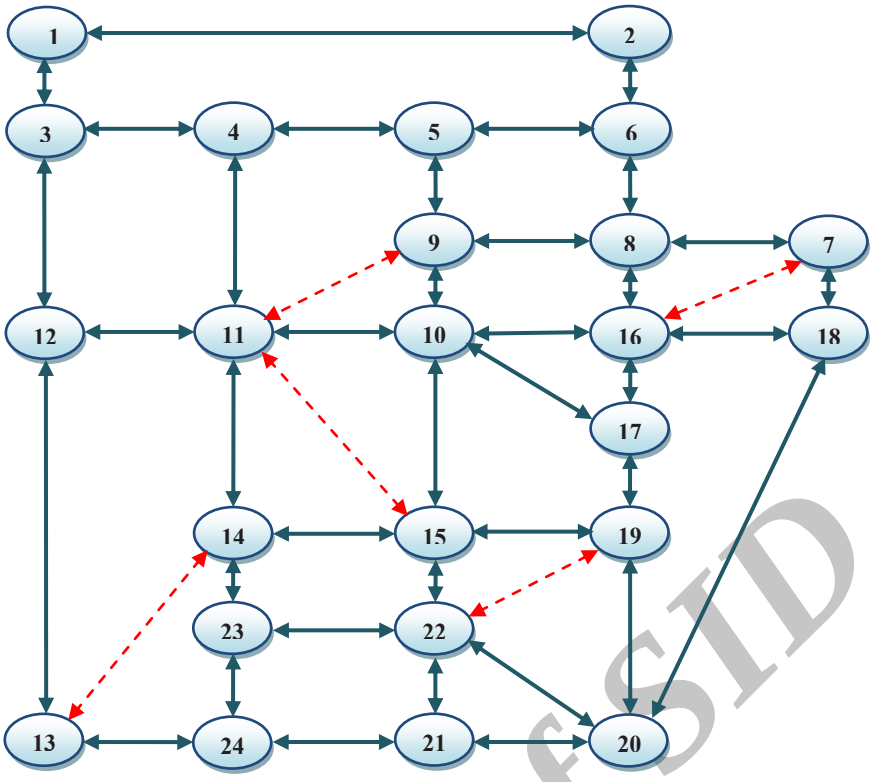
با توجه به شبکه‌ی شهری سوفالز، ۱۰ خیابان که شامل ۵ خیابان دوطرفه می‌باشند و به صورت نقطه‌چین در شکل ۵ نشان داده شده‌اند، کاندیدای اضافه شدن به شبکه هستند. جزییات این پروژه‌ها در پیوست ۱ ارایه گردیده است. با حل مدل ارایه شده می‌توان خیابان‌هایی را انتخاب و زمان‌بندی نمود که بیشترین منافع را به شبکه برساند.

۵-۱- تولید مسائل نمونه

مسئله‌ی انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل‌ونقل بر اساس مدل‌سازی انجام شده دارای پارامترهایی است که برای تولید مسئله باید تعیین شوند. بدین منظور افق برنامه‌ریزی(T)، ۵ سال و افق ارزیابی(T')، ۱۰ سال در نظر گرفته شده است و به این مفهوم است که پروژه‌های انتخاب شده از میان پروژه‌های پیشنهادی، می‌بایستی حداکثر در ۵ سال اول به بهره‌برداری برسند و منافع حاصل از بهره‌برداری این پروژه‌ها بلافاصله پس از بهره‌برداری، تا پایان سال دهم ادامه می‌یابد. یکی دیگر از پارامترهای مسئله که باید تعیین شود، تعداد پروژه‌های پیشنهادی(N) است. این پارامتر یکی از

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵. شبکه‌ی سوفالز

فاکتورهای تعیین‌کننده‌ی بُعد مسئله است، یعنی هر چه تعداد پروژه‌ها بیشتر باشد، ابعاد مسئله را تحت تاثیر قرار داده و آن را بزرگتر می‌کند. در اینجا سه مسئله مختلف در سه اندازه کوچک شامل ۵ پروژه‌ی پیشنهادی(N=5)، متوسط شامل ۷ پروژه‌ی پیشنهادی(N=7) و نسبتاً بزرگ شامل ۱۰ پروژه‌ی پیشنهادی(N=10) تعریف شده است. هزینه‌ی ساخت هر یک از این پروژه‌ها(c_{ij}) نیز با توزیع یکنواخت در بازه‌ی [۱۰,۳۰] تعیین شده است. از طرف دیگر، باید بودجه‌ی در دسترس هر یک از دوره‌های برنامه‌ریزی نیز مشخص گردد. بدین منظور ابتدا با استفاده از رابطه‌ی (۲۰) مجموع بودجه در دسترس در طول افق برنامه‌ریزی تعیین می‌شود

$$\frac{B}{\sum_{(i,j)\in A_2} c_{ij}} = d \qquad (۲۰)$$

که در این رابطه، B، مقدار بودجه‌ی کل را نشان می‌دهد و d نشان‌دهنده‌ی نسبتی است که برای این کسر تعیین می‌گردد. برای مقدار d می‌توان سطوح مختلفی را در نظر گرفت که در اینجا از سطح ۰/۵ استفاده شده است. یعنی در مسائل نمونه فرض شده است که بودجه در دسترس در طول افق برنامه‌ریزی برابر ۵۰ درصد هزینه موردنیاز برای اجرای کلیه پروژه‌های پیشنهادی می‌باشد. پس از محاسبه مقدار B ، مقادیر بودجه‌ی سالیانه، با استفاده از یک توزیع نرمال با میانگین $\frac{B}{T}$ و انحراف معیار $\frac{B}{6T}$ تعیین می‌گردد.

یکی دیگر از پارامترهای مورد نیاز برای حل مسئله، پارامتر α_{ij} است که تعیین کننده‌ی حداکثر نسبت قابل انجام پروژه‌ی jام در هر دوره است. برای مثال اگر برای پروژه‌ای، این پارامتر ۰/۵ باشد، به این معنی است که در هر دوره حداکثر ۵۰٪ این پروژه می‌تواند انجام شود و برای این که این پروژه تکمیل شده و قابل بهره‌برداری گردد، حداقل دو دوره‌ی زمانی زمان لازم است. پارامتر α_j با استفاده از یک توزیع یکنواخت در بازه $[0.7-\frac{cj-10}{50} \ , \ 1-\frac{cj-10}{50}]$ مشخص شده است.

با توجه به توضیحات فوق، سه مسئله تصادفی با ابعاد ۵، ۷ و ۱۰ پروژه پیشنهادی مطابق مشخصات مندرج در جدول ۱ تولید گردید.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱. پارامترهای تولید شده برای مسائل نمونه

پارامتر / مسئله	مسئله ۱	مسئله ۲	مسئله ۳
N	۵	۷	۱۰
d	٪ ۵۰	٪ ۵۰	٪ ۵۰
c	[۱۸ ۱۲ ۲۵ ۲۲ ۱۴]	[۱۲ ۱۳ ۱۷ ۱۶ ۲۷ ۲۴ ۲۴]	[۲۵ ۲۱ ۱۶ ۱۳ ۳۰ ۱۷ ۱۰ ۲۰ ۱۲ ۱۳]
α	[۰/۶ ۰/۸ ۰/۴ ۰/۵ ۰/۶]	[۰/۹ ۰/۹ ۰/۶ ۰/۷ ۰/۶ ۰/۶ ۰/۶]	[۰/۵ ۰/۶ ۰/۷ ۰/۷ ۰/۶ ۰/۴ ۰/۸ ۱ ۰/۶ ۰/۸ ۰/۷]
B	۴۶	۶۷	۸۸
B_t	[۶ ۹ ۱۲ ۹ ۱۰]	[۱۴ ۱۰ ۱۵ ۱۲ ۱۶]	[۱۵ ۲۲ ۱۳ ۲۱ ۱۷]

۵-۲- نتایج شمارش کامل

نتایج مربوط به روش شمارش کامل، در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. جهت محاسبه تابع هدف این مسائل، وزن هر دو شاخص استفاده شده در تابع هدف یکسان و برابر ۰.۵ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات این مقاله بر روی یک رایانه شخصی با پردازشگر Core i7 با سرعت ۳/۴ GHz و ۴ GB حافظه انجام پذیرفته است.

نتایج بدست آمده از روش شمارش کامل که در جدول ۳ منعکس شده است بیانگر دو نکته مهم به شرح زیر است:

الف- تعداد جواب‌های امکان‌پذیر مسئله با افزایش بُعد مسئله به صورت فزاینده‌ای افزایش می‌یابد.

ب- میانگین زمان حل به ازای هر جواب امکان‌پذیر با افزایش بُعد مسئله، افزایش می‌یابد.

دو نکته فوق در کنار هم نشان‌دهنده پیچیدگی فزاینده استفاده از روش شمارش کامل برای حل مسائل بزرگ است. یعنی با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل به صورت فزاینده افزایش پیدا می‌کند. به همین دلیل است که حل مسئله ۵ تایی، ۴ دقیقه، اما حل مسئله ۱۰تایی ۶ روز به طول انجامیده است. از این‌رو برای مسائل با ابعاد بزرگتر استفاده از روش شمارش کامل در عمل غیرمنطقی می‌باشد و لذا ضرورت بکارگیری روش‌هایی برای حل این مسائل که در یک مدت زمان منطقی جواب قابل قبولی را ارایه دهند، روشن می‌گردد.

پس از محاسبه‌ی جواب مسئله می‌توان مقادیر y_t^{ij} متناظر با آن را با استفاده از روش پیشنهادی امکان‌سنجی جواب‌ها مطابق جدول ۲ به دست آورد. البته لازم به ذکر است مقادیر y_t^{ij} لزوماً منحصربفرد نمی‌باشد و ممکن است به ازای هر جواب مسئله، حالات متعددی بر حسب y_t^{ij} قابل تعیین باشد، اما از آنجا که مقدار تابع هدف تمامی این جواب‌ها یکسان است، یافتن یکی از این جواب‌ها کافی می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲. مقادیر محاسبه شده برای متغیر y_t^{ij}

مسئله	ماتریس سهم انجام هر پروژه در هر دوره				
مسئله ۱ (N=۵)	۰/٤	۰/٦	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰/٤۷۲۲	۰/۲۲۲۲	۰/۳۰٥٦
	۰	۰	۰/۳۳۳٤	۰/۳۳۳۳	۰/۳۳۳۳
مسئله ۲ (N=۷)	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰
	۰/٦۲٥	۰/۳۷٥	۰	۰	۰
	۰	۰	۰/٦	۰/۲	۰/۲
	۰	۰	۰	۰/۳٤٦۲	۰/٦٥۳۸
	۰	۰	۰/۳۷۲۲	۰/۳۱۳۹	۰/۳۱۳۹
مسئله ۳ (N=۱۰)	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰
	۰/٦	۰/٤	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰/۷	۰/۳
	۰	۰	۰	۰/٥	۰/٥
	۰	۰/٤	۰/۳٦٦٦	۰/۱۱٦۷	۰/۱۱٦۷
	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۳. نتایج شمارش کامل برای مسائل نمونه

مسئله	مسئله ۱ (N=۵)	مسئله ۲ (N=۷)	مسئله ۳ (N=۱۰)
تعداد کل حالات	۷۷۷٦	۲۷۹۹۳٦	٦۰٤٦٦۱۷٦
تعداد جواب های امکان‌پذیر	۱٤۲	۲۰۰۲	۱۲۷۲٦٦
جواب بهینه	[٥۰۰۳۳]	[۰۰۰٥۳۲۳]	[۰۰٥۲۲٤۰۰۰۰]
مقدار جواب بهینه	۰/۱۹٤٥۳	۰/۳۰۳٤٤	۰/۳٤۸۰۸
کل زمان صرف شده (ثانیه)	۲٤۰/٦	٤٤٥۱/۸٤	٥۲۱۹٥٤/۲۱

Archive of SID

www.SID.ir

در این جدول سه ماتریس ارایه شده است که تعداد سطرهای ماتریس بیانگر تعداد پروژه‌ها و تعداد ستون‌های ماتریس بیانگر تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی می‌باشد و درایه‌های هر ماتریس نشان می‌دهد که چه سهمی از هر پروژه در هر دوره انجام شده است. زمانی که مجموع این سهم‌ها در یک سطر به مقدار ۱ برسد یعنی پروژه تکمیل شده و از آن دوره به بعد قابل بهره‌برداری است. با استفاده از این ماتریس می‌توان مقادیر بودجه تخصیص یافته به پروژه‌های پیشنهادی را در هر دوره برنامه‌ریزی مشخص کرد. این‌کار به سادگی با ضرب ماتریس y_t^{ij}ها در بردار c_{ij}ها انجام می‌پذیرد.

۵-۳- نتایج حل با GA پیشنهادی

باتوجه به این‌که مسائل نمونه در ابعاد مختلف تولید شده است، برای هر مسئله به صورت جداگانه باید تنظیم پارامتر انجام شده و مسئله حل شود. عواملی که در تنظیم پارامتر GA مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از: تعداد جمعیت در هر تکرار، تعداد تکرار الگوریتم، احتمال تقاطع، احتمال جهش، نرخ جهش، احتمال هر یک از عملگرهای تقاطع، و روش انتخاب جمعیت در هر نسل.

از آنجایی که علاوه بر کیفیت جواب، زمان حل مسئله نیز حائز اهمیت است، باید طراحی آزمایش‌ها بگونه‌ای انجام پذیرد که پارامتر زمان در تمامی آزمایش‌ها تقریباً ثابت باشد. بدین منظور در اینجا ٤ عامل تعداد جمعیت در هر تکرار، تعداد تکرار الگوریتم، احتمال تقاطع و احتمال جهش که به صورت مستقیم بر زمان حل الگوریتم مؤثر هستند به عنوان یک عامل ترکیبی در نظر گرفته می‌شود تا از این طریق بتوان پارامتر زمان را نیز کنترل نمود. از این‌رو عوامل نهایی عبارتند از:

۱- ترکیبی از تعداد جمعیت در هر تکرار، تعداد تکرار الگوریتم، احتمال تقاطع و احتمال جهش
۲- احتمال عملگرهای تقاطع
۳- نرخ جهش
٤- روش انتخاب هر نسل در هر تکرار

برای عامل اول، ٦ سطح و برای سایر عوامل ۳ سطح در نظر گرفته شده است. مقادیر این سطوح، مخصوصا سطوح مربوط به عامل اول، متناسب با ابعاد مسئله تنظیم شده است. سطوح تعریف شده برای عامل اول بگونه‌ای تنظیم شده است که زمان اجرای الگوریتم به ازای این سطوح تقریباً یکسان باشد. با توجه به نکاتی که ذکر شد، عوامل و سطوح آن‌ها برای مسئله ۱ در جدول ٤ نشان داده شده است.

جدول ٤. عوامل و سطوح تعریف شده برای مسئله ۱

عامل	نماد	سطوح تعیین شده
ترکیبی از تعداد جمعیت در هر تکرار *(npop)*، تعداد تکرار الگوریتم *(it)*، احتمال تقاطع *(pc)*و احتمال جهش *(pm)*	*A*	*A(1) : npop=20, it=28, pc=0.6, pm=0.4* *A(2) : npop=16, it=36, pc=0.6, pm=0.3* *A(3) : npop=12, it=42, pc=0.7, pm=0.2* *A(4) : npop=10, it=55, pc=0.6, pm=0.4* *A(5) : npop=8, it=60, pc=0.7, pm=0.3* *A(6) : npop=8, it=70, pc=0.6, pm=0.2*
احتمال عملگرهای تقاطع *Single-Point(SP), Double-Point(SP), Uniform(U)*	*B*	*B(1) : SP=0.1, DP=0.2 ,U=0.7* *B(2) : SP=0.05, DP=0.1 ,U=0.85* *B(3) : SP=0, DP=0 ,U=1*
نرخ جهش *(mu)*	*C*	*C(1) : 0.2* *C(2) : 0.4* *C(3) : 0.6*
روش انتخاب جمعیت در هر نسل	*D*	*D(1)*: ۱۰۰٪ از بهترین‌ها *D(2)*: ۹۰٪ از بهترین‌ها و ۱۰٪ به صورت تصادفی *D(3)*: ۸۰٪ از بهترین‌ها و ۲۰٪ به صورت تصادفی

Archive of SID

www.SID.ir

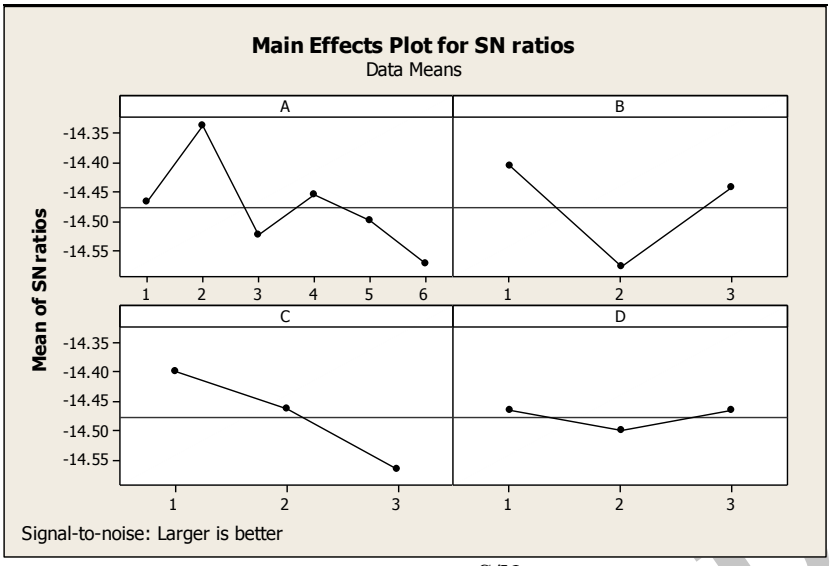
با توجه به تعداد عوامل و سطوح تعریف شده، جهت طراحی آزمایش ها از آرایه متعامد استاندارد هجده سطری(L18) استفاده شده است. مشخصات آزمایش‌ها و مقدار هدف آن‌ها در جدول ۵ آمده است. از آنجایی که GA، یک الگوریتم جستجوی تصادفی هوشمند است، برای اعتماد به جواب‌های به دست آمده، هر آزمایش ۵ بار تکرار شده و میانگین توابع هدف بدست آمده به عنوان مقدار هدف هر آزمایش گزارش شده است. همچنین نسبت S/N حاصل از این آزمایش‌ها در شکل ٦ نشان داده شده است. در این نمودار، هر یک از عوامل و سطوح مربوط به آن‌ها در مقیاسی مشابه نشان داده شده و با هم مقایسه شده‌اند. در این تحلیل هر چه مقدار S/N برای یک سطح بالاتر باشد، یعنی آن سطح به بهینگی نزدیکتر است. از این‌رو سطوح بهینه برای عوامل تعیین شده مطابق جدول ٦، تشخیص داده می‌شود.

جدول ۵. مقادیر تابع هدف به دست آمده مطابق با آزمایش‌های جدول L18 برای مسئله ۱

آزمایش	A	B	C	D	مقدار تابع هدف
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۱۹۳۵۸
۲	۱	۲	۲	۲	۰/۱۸۵۸۹
۳	۱	۳	۳	۳	۰/۱۸۷۸۳
٤	۲	۱	۱	۲	۰/۱۹٤۵۳
۵	۲	۲	۲	۳	۰/۱۹۰۹٦
٦	۲	۳	۳	۱	۰/۱۹۰۳۰
۷	۳	۱	۱	۱	۰/۱۸۸٤۰
۸	۳	۲	۲	۲	۰/۱۸۳۸۸
۹	۳	۳	۱	۳	۰/۱۹۱۲۵
۱۰	٤	۱	۳	۳	۰/۱۸۸٤۵
۱۱	٤	۲	۱	۱	۰/۱۸۹۳۵
۱۲	٤	۳	۲	۲	۰/۱۹۰۱۸
۱۳	۵	۱	۲	۳	۰/۱۹۱۰۸
۱٤	۵	۲	۳	۱	۰/۱۸٤۷۱
۱۵	۵	۳	۱	۲	۰/۱۸۹۳۸
۱٦	٦	۱	۳	۲	۰/۱۸٦٤٤
۱۷	٦	۲	۱	۳	۰/۱۸۵۳٤
۱۸	٦	۳	۲	۱	۰/۱۸۸۵۷

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ٦. نسبت S/N به ازای سطوح مختلف برای مسئله ۱

جدول ٦. سطوح بهینه مربوط به پارامترهای GA در مسئله ۱

عامل	A	B	C	D
شماره سطح بهینه	۲	۱	۱	۱

جدول ۷. سطوح بهینه تعیین شده برای پارامترهای GA با استفاده از روش تاگوچی

پارامتر / مسئله	تعداد جمعیت در هر تکرار	تعداد تکرار الگوریتم	احتمال تقاطع	احتمال جهش	نرخ جهش	احتمال عملگر یک نقطه‌ای	احتمال عملگر دو نقطه‌ای	احتمال عملگر یکنواخت	روش انتخاب جمعیت در هر نسل
مسئله ۱	١٦	٣٦	۰/٦	۰/٣	۰/٢	۰/١	۰/٢	۰/٧	١٠٠٪ از بهترین‌ها
مسئله ۲	١٥	٦٠	۰/٦	۰/٣	۰/١	۰	۰	١	١٠٠٪ از بهترین‌ها
مسئله ۳	٣٠	١٠٠	۰/٦	۰/٤	۰/١	۰/٠٥	۰/١	۰/٨٥	١٠٠ ٪ از بهترین‌ها

جدول ۸. نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای GA برای حل مسائل نمونه

مسئله	جواب بهینه	تعداد دفعات دستیابی به جواب بهینه	میانگین مقدار جواب به دست آمده با *GA*	میانگین درصد خطا	میانگین زمان حل (ثانیه)
مسئله ۱	۰/١٩٤٥٣	٧	۰/١٩٣٢٧٩	۰/٦٣	١٠٨
مسئله ۲	۰/٣٠٣٤٤	٦	۰/٣٠٣٠٤٨	۰/١٣	٤٩٩
مسئله ۳	۰/٣٤٨٠٨	٦	۰/٣٤٥٧٢٨	۰/٦٨	١٦٥٠

برای مسائل ۲ و ۳ نیز مشابه مسئله ۱، روش تاگوچی مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت سطوح بهینه پارامترهای GA در این سه مسئله مطابق جدول ۷ تعیین شد.

با تنظیم پارامترهای GA مطابق سطوح بهینه‌ی حاصل از روش تاگوچی، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی آماده اجرا خواهد بود. برای درک بهتر از عملکرد الگوریتم پیشنهادی، برای هر یک از مسائل نمونه روش پیشنهادی ۱۰ مرتبه اجرا گردید. نتایج حاصل از بکارگیری GA در جدول ۸ خلاصه شده است. لازم

Archive of SID

www.SID.ir

به ذکر است کـه مقـدار جـواب بهینـه منـدرج در ایـن جـدول برگرفته از حل مسئله با روش دقیق می‌باشد.

عملکرد GA پیشنهادی در حـل مسـائل نمونـه از دو جنبـه کیفیت جواب و زمان حل قابل ارزیابی اسـت. از جنبـه کیفیـت جواب، در جدول ۸ مشاهده مـی‌شـود GA در اکثـر مواقـع بـه جواب بهینه دست یافته است و میانگین درصد خطای آن کمتـر از یک درصد می‌باشد. از آنجا که تمامی الگوریتم‌هـا بـه غیـر از الگوریتم‌های دقیق به دنبال یافتن یک جواب خوب و نـه لزومـاً بهینه هستند، یک درصد خطا سـطح کـاملاً مطلـوبی بـرای ایـن الگوریتم‌ها می‌باشد. لذا از جنبه کیفیـت جـواب، GA عملکـرد بسیار قابل قبولی را در مسائل نمونه از خود نشـان مـی‌دهـد. در خصوص جنبه زمان حل نیز با مقایسه زمان حـل GA بـا زمـان روش دقیق مشاهده می‌شود که GA همواره زمان حلی کمتـر از زمان حل روش دقیق داشته است و با بزرگتر شدن مسـئله، GA عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد، بگونه‌ای کـه در مسـئله ۱ زمان حل روش دقیـق حـدوداً دو برابـر زمـان حـل روش GA است، اما در مسئله ۳ ایـن نسـبت بـیش از ۳۰۰ مـی‌باشـد . بـه عبارت دیگر با بـزرگ شـدن ابعـاد مسـئله، نسـبت زمـان حـل الگوریتم ژنتیک به زمـان حـل روش دقیـق بـا رونـدی فزاینـده کاهش می‌یابد و این موضوع نشان‌دهنـده عملکـرد قابـل قبـول GA پیشنهادی از جنبه زمان به ویژه در مسائل با مقیاس بـزرگ می‌باشد.

٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله یکپارچه انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل‌ونقل شهری مورد بررسی قرار گرفت. یکپارچه‌سازی انتخاب و زمان‌بندی پروژه‌ها در قالب مدل معرفی شده، صحت نتایج را بالا می‌برد، اما از سوی دیگر پیچیدگی حل آن را نیز افزایش می‌دهد. نتایج حل این مدل بیانگر آن است که با افزایش بُعد مسئله تعداد جواب‌های امکان‌پذیر مسئله و همچنین زمان حل به صورت فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. از این‌رو حل دقیق مدل در مسائل بزرگ نیازمند زمان بسیار زیادی است و این موضوع ضرورت استفاده از رویکردهایی نظیر الگوریتم‌های تکاملی برای حل این مسئله را توجیه پذیر می‌نماید. در این مقاله، روشی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای حل مدل موردنظر توسعه داده شد. در طراحی این الگوریتم سعی شد که به صورت هوشمندانه با جستجوی بخش کوچکی از کل فضای جواب، جواب بهینه یا نزدیک به بهینه بدست آید. نتایج آزمون‌های محاسباتی، بیانگر عملکرد قابل قبول الگوریتم پیشنهادی، چه از جنبه کیفیت جواب و چه از جنبه زمان حل، می‌باشد. از دیگر نوآوری‌های این تحقیق، تعریف شاخصی جهت سنجش میزان نارضایتی استفاده‌کنندگان سیستم حمل‌ونقل از جنبه زمان سفر می‌باشد، که شاخص ارایه شده می‌تواند مکمل شاخص‌هایی نظیر کل زمان سفر در شبکه باشد. یکی از موضوعاتی که می‌تواند به عنوان زمینه مطالعاتی آتی مورد مطالعه قرار بگیرد، یافتن رویکردهایی برای کاهش زمان حل این مسئله است. از آنجا که عمده زمان حل مسئله موردنظر صرف حل مسئله تخصیص ترافیک شبکه می‌شود، لذا تمرکز بر روش‌هایی جهت کاهش زمان حل مسئله تخصیص ترافیک متناسب با ساختار مسئله مورد بررسی می‌تواند زمان حل را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Transportation Investment Projects
2. Braess paradox
3. project selection problem
4. infrastructure transportation projects
5. maintenance and rehabilitation projects
6. Multi-Attribute Decision Making
7. Multi-Objective Decision Making
8. Analytic Hierarchy Process
9. Simple Additive Method
10. interdependency
11. multi-objective 0–1 knapsack problem
12. Discrete Network Design Problem
13. mixed integer programming
14. nonlinear programming
15. Taguchi
16. Sioux Falls

۸- مراجع

- Barfod, M. B., Salling, K. B. and Leleur, S. (2011) "Composite decision support by combining cost-benefit and multi-criteria decision analysis", Decision Support Systems, Vol. 51, pp. 167–175.
- Berechman, J. and Paaswell, R. (2005) "Evaluation, prioritization and selection of transportation investment projects in New York City", Transportation, Vol. 32, pp. 223-249.
- Button, K.J. and Pearman, A.D. (1983) "The Practice of Transportation Investment Appraisal", Avebury, UK.

Archive of SID

www.SID.ir

pp. 285-291.

- Teng, J. and Tzeng, G. (1996) "A multiobjective programming approach for selecting non-independent transportation investment alternatives", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 30, pp. 291-307.
- Teng, J. and Tzeng, G. (1998) "Transportation investment project selection using fuzzy multiobjective programming", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 96, pp. 259-280.
- Tsamboulas, D. A. (2007) "A tool for prioritizing multinational transport infrastructure investments", Transport Policy, Vol. 14, pp. 11–26.
- Ugwu, O.O., Kumaraswamy, M.M., Wong, A. and Ng, S.T. (2006) "Sustainability appraisal in infrastructure projects (SUSAIP). Part 1: Development of indicators and computational methods", Automation in Construction, Vol. 15, pp. 239–251.
- Weng, K. and Qu, B. (2009) "The optimization of road building schedule based on budget restriction", Kybernetes, Vol. 38, No. 3, pp. 441-447.
- Yang, H. and Zhou, J. (1998) "Optimal traffic counting location for origin-destination matrix estimation", Transportation Research Part B, Vol. 32, No. 2, pp. 109-126.
- Ziara, M., Nigim, K., Enshassi, A. and Ayyub, B. M. (2002) "Strategic Implementation of Infrastructure Priority Projects: Case Study in Palestine", Journal of Infrastructure Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 2-11.
- رضایی، ع. و اصغرزاده، س. م.(۱۳۸۷) "ارزیابی گزینه‌های پیشنهادی برای حمل و نقل همگانی شهر مشهد"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- Gerçek, H., Karpak, B. and Kilinçaslan, T. (2004) "A multiple criteria approach for the evaluation of the rail transit networks in Istanbul", Transportation, Vol. 31, pp. 203–228.
- Iniestra, J. G. and Gutierrez, J. G. (2009) "Multicriteria decisions on interdependent infrastructure transportation projects using an evolutionary-based framework", Applied Soft Computing, Vol. 9, pp. 512-526.
- Joumard, R. and Nicolas, J.-P. (2010) "Transport project assessment methodology within the framework of sustainable Development", Ecological Indicators, Vol. 10, pp. 136–142.
- Kim B. J., Kim W. and Song, B. H. (2008) "Sequencing and scheduling highway network expansion using a discrete network design model", The Annals of Regional Science, 42:621–642.
- Pan, N-F. (2008) "Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method", Automation in Construction, Vol. 17, pp. 958–965.
- Poorzahedy, H. and Rouhani, O.M. (2007) "Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem", European Journal of Operational Research, Vol. 182, No. 2, pp. 578–596.
- Selih, J., Kne, A., Srdic, A. and Zura, M. (2008) "Multiple-criteria decision support system in highway infrastructure management", Transport, Vol. 23, No. 4, pp. 299–305.
- Shelton, J. and Medina, M. (2010) "Prioritizing Transportation Projects using an Integrated Multiple Criteria Decision Making Method", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2174, pp. 51-57.
- Su, C. W., Cheng, M. Y. and Lin, F. B. (2006) "Simulation-enhanced approach for ranking major transport projects", Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 12, No. 4,

Archive of SID

www.SID.ir

پیوست ۱. مشخصات کمان‌های پیشنهادی جهت اضافه شدن به شبکه

شماره‌ی کمان	گره‌ی مبدأ	گره‌ی مقصد	زمان سفر آزاد (10^{-2} hr)	پارامتر ازدحام (10^{-4} hr/(1000veh/day)^4)
۱	۷	۱۶	۳	۰/۰۰۳۲۱
۲	۱۶	۷	۳	۰/۰۰۳۲۱
۳	۱۳	۱۴	۱	۰/۰۰۱۶۰
٤	۱۴	۱۳	۱	۰/۰۰۱۶۰
۵	۱۱	۱۵	۱/۵	۰/۰۰٤۱۱
٦	۱۵	۱۱	۱/۵	۰/۰۰٤۱۱
۷	۹	۱۱	۲/۱٤	۰/۰۰۰۲۸
۸	۱۱	۹	۲/۱٤	۰/۰۰۰۲۸
۹	۱۹	۲۲	۱	۰/۰۰۰٤۲
۱۰	۲۲	۱۹	۱	۰/۰۰۰٤۲

Archive of SID

www.SID.ir