چهاردهمین کنگره ملّی مهندسی عمران، ۱و ۲ خردادماه ۱۴۰۳
دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

بهینه‌یابی زمان–هزینه در پروژه‌های عمرانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب

محمدحسین طالب‌پور[۱]، محمدرضا خدابخشی[۲]

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان

۲- کارشناس ارشد سازه، موسسه آموزش عالی و غیرانتفاعی – غیردولتی شاهرود

⋮

M.H.Talebpour@du.ac.ir

خلاصه

عوامل زمان و هزینه از جمله عوامل مهم در پروژه‌های عمرانی می‌باشد که تاثیر مستقیم در کیفیت و کمیت بهره‌برداری پروژه دارد. بنابراین طرح مسئله چند هدفه زمان و هزینه برای یک پروژه عمرانی جهت نیل به بهترین حالت ممکن امری مهم و ضروری است. بدین منظور در این مقاله مسئله بهینه‌یابی زمان – هزینه (TCO) با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا دو عامل زمان و هزینه و تاثیر آن‌ها بر یکدیگر در پروژه‌های عمرانی تشریح و سپس فرمول‌بندی مسئله بهینه‌یابی بیان شده است. در ادامه با شرح الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب، یک پروژه هفت فعالیتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این پروژه دارای تقدم و تاخر در فعالیت‌ها بوده که در چندین حالات ممکن قابل انجام می‌باشد. نتایج حاصل از NSGA-II با سایر روش‌های بهینه‌یابی برای مثال مذکور مقایسه شده است. این نتایج دلالت بر عملکرد مناسب روش NSGA-II در نیل به نقطه بهینه دارد. این روش با استفاده از دو مفهوم رتبه‌بندی و فاصله ازدحام، سیر همگرایی مناسبی در نیل به نقطه کمینه دارد. میانگین جواب‌های نسل آخر فرآیند بهینه‌یابی بسیار نزدیک به جواب بهینه است.

کلمات کلیدی: بهینه‌یابی، زمان، هزینه، مدیریت پروژه، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب.

۱. مقدمه

هر پروژه عمرانی متشکل از فعالیت‌های گوناگونی است که با اجرای کامل تمام فعالیت‌ها در بخش‌های مختلف، به سرانجام می‌رسد. در این راستا اتمام پروژه طی زمان مشخص با کمترین هزینه از اساسی‌ترین دغدغه‌های مدیران پروژه است. چراکه تاخیر در انجام پروژه سبب بعضا بروز مسائل غیراقتصادی و نیز تغییر در هزینه‌های پیش‌بینی شده، خواهد شد. بدین‌ترتیب عوامل زمان و هزینه تاثیر مستقیم بر اجرا و بهره‌برداری از پروژه خواهد داشت [۲-۱]. از سوی دیگر پیچیدگی و مشکلات پروژه‌های عمرانی سبب می‌شود که در برخی مواقع در فاز اجرایی، هزینه‌ها و زمان انجام فعالیتی از یک پروژه تغیر نماید. این تغیرات می‌تواند منجر به تغیر در شرایط یک قرداد اجرایی شود. بنابراین برنامه‌ریزی موثر و برآورد زمان و هزینه از عوامل مهم دستگاه‌های اجرایی در بستن قرداد می‌باشد. این برنامه‌ریزی می‌بایست با پیش‌بینی صحیح و درک مناسب از شرایط، زمان و هزینه‌های کلی پروژه طرح‌ریزی شود. به بیان دیگر می‌توان اذعان داشت که به سبب عدم قطعیت در ماهیت کنترل و مدیریت پروژه‌ها، تاخیر در اتمام به موقع یک پروژه امری محتمل است. بروز این اتفاق سبب افزایش هزینه‌های اجرایی در زمینه‌های مختلف خواهد شد. بدین‌ترتیب طرح مسئله موازنه زمان و هزینه برای موفقیت یک پروژه عمرانی لازم و اجتناب‌ناپذیر است. چراکه هدف اصلی پروژه‌های عمرانی، تکمیل پروژه براساس بودجه و زمان مقرر می‌باشد. ایجاد تعادل مطلوب بین زمان و هزینه در یک پروژه می‌تواند در موفقیت پروژه و دستگاه اجرایی نقش موثر و بسزایی داشته باشد. این بدان معنا است که زمان و هزینه می‌بایست به طور همزمان در برنامه‌ریزی مراحل و فعالیت‌های پروژه لحاظ شود [۴-۳]. براین اساس امروزه لزوم برنامه‌ریزی مناسب در جهت برآورد صحیح از زمان و هزینه‌های پروژه‌های عمرانی، امری مهم و ضروری است. بدین‌ترتیب تغیرات زمان و هزینه در پروژه‌های عمرانی، مسئله بهینه‌سازی را برای رسیدن به طرحی مناسب مطرح می‌سازد. در این راستا تحقیقات وسیعی جهت حل مسئله موازنه زمان و هزینه صورت گرفته است. اما مطالعات برای رسیدن به مدل‌هایی با قابلیت دستیابی به برنامه‌ای بهینه در مدت زمان کوتاه‌تر و نیز ارائه طرحی مطمئن‌تر همچنان ادامه دارد.

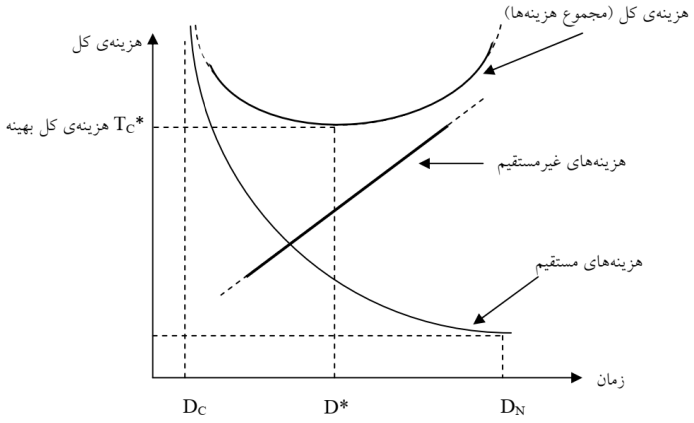
بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که نخستین بار مسئله بهینه‌یابی زمان- هزینه (TCO) به عنوان دو معیار اصلی پروژه در سال ۱۹۶۱ بصورت ابتدایی مطرح شد. سپس در ادامه با افزایش مفاد و کیفیت علمی قردادهای مهندسی، مسئله موازنه زمان- هزینه، رویکردهای نوینی را به خود اختصاص داد. این مهم سبب شد تا بتدریج از دهه نود میلادی به بعد، مسئله بهینه‌یابی زمان – هزینه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گیرد [۵]. در این راستا بابو و سورش از جمله محققینی بودند که مسئله TCO را بررسی نمودند. آن‌ها با ارائه پیشنهاداتی سعی در توسعه روش برنامه‌ریزی خطی (LP) برای حل مسئله بهینه‌یابی زمان – هزینه داشتند. برای این منظور سه راهکار پیشنهادی ارائه و با حل یک مسئله چهارده فعالیتی، قابلیت مدل‌های پیشنهادی را ارزیابی نمودند [۶]. در این راستا خانگ و مینت روش پیشنهادی آن‌ها را در یک پروژه واقعی ساخت کارخانه سیمان مورد بررسی قرار دادند. این محققین با ارزیابی روش‌های تحقیق باو و سورش سعی در بیان مشکلات عملی و اجرایی برای پروژه‌های واقعی TCO داشتند [۷]. در ادامه فنگ و همکاران با پیشنهاداتی سعی در بهبود الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله TCO نمودند. آن‌ها در فرآیند حل مسئله TCO از روش مسیر بحرانی (CPM) استفاده و با بیان مثالی با فضای جستجوی بزرگ، کارآمدی راهکارهای پیشنهادی را ارزیابی نمودند [۸]. در تحقیق دیگری مسئله بهینه‌یابی زمان و هزینه توسط جمعی از محققین با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل در این تحقیق با روش‌های دیگر مقایسه شده است [۹].کریستوبال با ارائه پیشنهادی بر مبنای سیستم دودویی برای روش IP سعی در بهبود عملکرد الگوریتم در مسئله TCO نمودند. این محقق مدل پیشنهادی را در پروژه ساخت راه مورد ارزیابی قرار داد [۱۰]. در تحقیق دیگر روشی بر مبنای GA برای حل مسئله TCO ارائه شد که قابلیت حل مسائلی با فضای بزرگ را دارد. این روش از قابلیت زمانبندی سیستم مدیریت پروژه در ارزیابی تاریخ تکمیل پروژه در طول بهینه‌سازی بهره برده و تضمین می‌نماید که تمام پارامترهای برنامه‌ریزی، از جمله روابط فعالیت، وقفه‌ها، محدودیت‌ها، منابع و .. در تعیین تاریخ تکمیل پروژه در نظر گرفته شوند [۱۱]. ژنگ و همکاران با ارائه مدلی از GA سعی در حل مسئله TCO نمودند و نتایج را با سایر الگوریتم‌های بهینه‌یابی مورد مقایسه قرار دادند. این محققین روش پیشنهادی را در مسائل بزرگ و یا پیچیده TCO کارآمد و موثر می‌دانند [۴]. همچنین ژنگ و همکاران در تحقیق دیگر یک مدل چندمنظوره مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله TCO ارائه نمودند. در این مدل با توجه به عملکرد هر نسل، فرآیند بهینه‌یابی بهبود می‌بخشد. همچنین در روش پیشنهادی مدل رده‌بندی پارتو به عنوان معیار انتخاب در نظر گرفته شده است [۱]. جلالی و شیروانی با ارائه یک مدل عملی با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به موازنه زمان و هزینه در مسائل مدیریت پروژه نمودند. آن‌ها در فرآیند بهینه‌یابی هزینه کل پروژه را به عنوان تابع هدف منظور و عوامل زمان و هزینه فعالیت‌ها را به عنوان قیود در نظر گرفته‌اند. همچنین دستورالعمل‌هایی برای به کارگیری GA در مسائل موازنه زمان و هزینه ارائه داده‌اند [۱۲].

همان‌طور که پیشتر بیان شد، موازنه زمان و هزینه در پروژه‌های عمرانی امری مهم و ضروری می‌باشد که با طرح مسئله بهینه‌یابی، برای دستیابی به بهترین حالت ممکن تلاش می‌شود. بدین‌منظور در این مقاله ابتدا مسئله بهینه‌یابی زمان – هزینه (TCO) طرح و جزئیات آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور توابع زمان و هزینه و اهمیت آن‌ها در یک پروژه عمرانی تشریح و ارتباط پنهانی این دو تابع مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه براساس رابطه زمان و هزینه و نیز سایر عوامل، فرمول‌بندی مسئله بهینه‌یابی بیان شده است. در گام بعدی ضمن شرح الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)، یک پروژه عمرانی با هفت فعالیت در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از فرآیند بهینه‌یابی با سایر مراجع مقایسه شده است. نتایج دلالت بر عملکر مناسب روش NSGA-II در نیل به نقطه بهینه دارد. بر این اساس می توان پروژه را در کمترین زمان و هزینه به سرانجام رساند. شرح کامل موارد مذکور در بخش‌های آتی بطور کامل بیان شده است.

۲. بهینه‌یابی زمان – هزینه (TCO) با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب

همان‌طور که پیشتر بیان شد، طرح مسئله بهینه‌یابی زمان-هزینه در پروژه‌های عمرانی از اهمیت بالایی برخوردار است. براین اساس در یک پروژه عمرانی، پس از تعیین فعالیت‌ها، مشخص کردن وابستگی‌ها، تخمین منابع مورد نیاز و ...، برآورد زمان اجرای هر فعالیت و به تبع آن زمان اجرای پروژه مشخص می‌شود. بایستی توجه داشت که مدت زمان هر فعالیت براساس زمان انجام فعالیت و زمان تخصیص منابع لازم سنجیده خواهد شد. بدین‌ترتیب مدت زمان فعالیت‌ها دارای ورودی‌های متعددی همچون عوامل محیطی، سطح دسترسی به منابع و ... می‌باشد. از سوی دیگر خروجی این فرآیند برآورد مدت زمان هر فعالیت است که عموما به صورت یک عدد گسسته بیان می‌گردد. پس از برآورد زمان، با ایجاد زمان‌بندی برای هر فعالیت و کل پروژه، مبنای نظارت بر روند پروژه در ابعاد زمانی مشخص می‌شود. استفاده از نمودار شبکه‌ای و تحلیل مسیر بحرانی ابزاری برای کنترل زمان‌بندی پروژه است. روش مسیر بحرانی روشی است که در برآورد مدت زمان حداقل پروژه استفاده می‌شود و مقدار انعطاف‌پذیری زمان‌بندی را در مسیر منطقی شبکه، براساس مدل زمان‌بندی تعیین می‌نماید. از سوی دیگر در فرآیند برآورد زمان، تخمین هزینه، بودجه‌بندی هزینه و کنترل هزینه از متغیرهای اساسی

می‌باشند. این سه متغیر با فرآیندی تحت عنوان مدیریت هزینه برای فعالیت‌های پروژه ارزیابی خواهد شد. مهم‌ترین بحث در مدیریت هزینه پروژه‌های عمرانی، هزینه‌های فاز ساخت خواهد بود که به دوبخش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. اساس این تقسیم‌بندی عموما مبتنی بر وابستگی و عدم وابستگی هزینه به فعالیت‌های پروژه یا کل پروژه است. عموما هزینه‌های مستقیم مربوط به یک فعالیت بوده در حالی که هزینه‌های غیرمستقیم قابل تفکیک به یک فعالیت نبوده و برای کل پروژه تعریف می‌شوند. مقدار هزینه‌های مستقیم با کاهش زمان فعالیت یا زمان اتمام پروژه، افزایش می‌یابد. این در حالی است که هزینه‌های غیرمستقیم با افزایش زمان پروژه افزایش خواهد یافت. از مجموع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم، هزینه کل پروژه بدست خواهد آمد که بشرح شکل ۱ قابل نمایش است [۱۵-۱۳].



شکل ۱ – نمودار زمان بهینه اتمام پروژه

نقطه بهینه زمانی اتمام پروژه (D^*) که به ازای هزینه بهینه برای کل پروژه (T^*_C) حاصل می‌گردد، در بازه زمانی اتمام پروژه براساس زمان نرمال فعالیت‌ها (D_N) تا زمان اتمام پروژه به ازای زمان فشرده فعالیت‌ها (D_C) قرار دارد. این نقطه حداقل مقدار ممکن در موازنه زمان و هزینه برای کل پروژه می‌باشد. به بیان دیگر تعیین اقتصادی‌ترین زمان برای اجرا پروژه و بررسی میزان حساسیت تغییرات هزینه در مقابل تغییرات زمان، مسئله بهینه‌یابی زمان-هزینه را شکل می‌دهد. برای این منظور می‌توان کوتاه‌سازی زمان پروژه را براساس روش مسیر بحرانی با بازنگری و ارزیابی برنامه زمان‌بندی اجرا نمود. برای نیل به این هدف معیار هزینه تسریع واحد زمانی برای فعالیت‌های پروژه تعریف می‌شود. با یافتن کمترین هزینه تسریع، فشرده‌سازی فعالیت مورد نظر جهت کمینه‌سازی زمان-هزینه صورت می‌پذیرد. این فرآیند با انتخاب مجموعه‌ای از فعالیت‌ها برای فشرده‌سازی زمانی با هدف کمینه‌سازی هزینه براساس الگوریتم بهینه‌یابی انجام خواهد شد [۱۵-۱۳].

بدین‌ترتیب می‌توان بیان نمود که مسئله موازنه زمان-هزینه، یک مسئله بهینه‌یابی دو هدفه است. برای بهینه‌یابی این قبیل مسائل که بعضا اهداف مسئله داری تناقض و یا تضاد می‌باشند، می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده نمود. قابلیت جستجوی فضای طراحی با مجموعه‌ای از جواب‌ها تحت عنوان جمعیت، مزیتی برای الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل چند هدفه است. این قابلیت ابزاری توانمند در این روش‌ها بویژه در الگوریتم ژنتیک برای یافتن مجموعه‌ای از جواب‌های مناسب می‌باشد. جواب‌های مناسب، پاسخ هایی برای مسئله می‌باشند که توازن نسبی بین اهداف مسئله همچون زمان و هزینه را برقرار می‌نمایند. به این پاسخ‌ها، جواب‌های متعادل کننده گفته می‌شود که تصمیم گیرنده می‌تواند برحسب شرایط مسئله یکی از آنها را برگزیند. بر این اساس پاسخ بهینه، جوابی است که در مقایسه با هیچ جواب دیگر در فضای تصمیم مسئله مغلوب نباشد. چنین جواب بهینه‌ای جواب بهینه پارتو نامیده می‌شود و مجوعه این جواب‌ها در یک مسئله چند هدفه، مجموعه بهینه پارتو نامیده می‌شود. به بیان دیگر جواب نامغلوب، پاسخی است که امکان بهبود یکی از اهداف تنها با بدتر شدن، حداقل یکی دیگر از اهداف مسئله امکان پذیر است. به نقاط نامغلوب در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، نقاط پارتو گفته می‌شود و مقادیر تابع هدف متناظر با آن‌ها در فضای معیارها، جبهه پارتو را تشکیل می‌دهند. هدف نهایی الگوریتم بهینه‌یابی، تشخیص جواب‌های مطلوب در مجموعه بهینه پارتو است. برخی از الگوریتم‌های بهینه‌یابی همچون الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) در مسائل چند هدفه، با دسته‌بندی پاسخ‌ها به دو بخش مغلوب و نامغلوب، فرآیند بهینه‌یابی را در پیش می‌گیرند [۱۵-۱۳]. شرح کامل این روش در بخش‌های آتی به تفسیر بیان خواهد شد.

۱.۲. مدل ریاضی مسئله بهنیه‌یابی زمان – هزینه TCO

همان‌طور که پیشتر بیان شد، مسئله بهینه‌یابی زمان–هزینه یک مسئله بهینه‌یابی دو هدفه می‌باشد. براین اساس در این مقاله فرمول‌بندی ریاضی مسئله بهینه‌یابی زمان–هزینه بشرح زیر درنظر گرفته شده است. برای این منظور دو تابع هدف مسئله به صورت زیر تعریف شده است:

$$Min\ F_1 = T \tag{1}$$

$$Min\ F_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in K_i} \alpha_{ij} \times C_{ij} + T \times M \tag{2}$$

در رابطه (۱)، F_1 زمان انجام پروژه می‌باشد که با متغیر T نشان داده می‌شود. در رابطه (۲)، F_2 تابع هزینه کل است که می‌بایست حداقل شود. در این رابطه I مجموعه کلیه فعالیت‌های پروژه، K_i مجموعه روش‌های اجرای فعالیت iام، M هزینه غیرمستقیم پروژه به ازای واحد زمانی (روز)، C_{ij} هزینه فعالیت iام در صورت انتخاب روش اجرای jام و α_{ij} متغیر تصمیم‌گیری مسئله جهت انتخاب روش انجام هر فعالیت می‌باشد. از سوی دیگر قیود مسئله بهینه‌یابی نیز بشرح زیر درنظر گرفته شده است.

$$\alpha_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I, j \in K_i \tag{3}$$

$$\sum_{j \in K_i} \alpha_{ij} = 1 \qquad \forall i \in I \tag{4}$$

$$t_1^s = 0 \tag{5}$$

$$t_i^f = t_i^s + \sum_{j \in K_i} \alpha_{ij} \times d_{ij} \qquad \forall i \in I \tag{6}$$

$$t_a^s + \sum_{j \in K_a} \alpha_{aj} \times d_{aj} \geq t_n^s \qquad \forall \{(m,n) | m\ is\ prerequisite\ to\ n\} \tag{7}$$

$$T = \max \{ t_i^f \ | \forall i \in I \} \tag{8}$$

در روابط فوق t_1^s زمان شروع اولین فعالیت، t_i^s زمان شروع فعالیت iام، t_i^f زمان پایان فعالیت iام و d_{ij} مدت زمان انجام فعالیت iام در صورت انتخاب روش اجرای jام می‌باشد. لازم به ذکر است که براساس رابطه (۷) شرط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه برقرار خواهد شد. بدین‌ترتیب هیچ فعالیتی قبل از پایان پیش‌نیازهای آن شروع نخواهد شد. همچنین براساس رابطه (۶) زمان پایان هر فعالیت براساس زمان شروع فعالیت و مدت زمان روش انتخابی آن محاسبه می‌گردد. قید رابطه (۴) نیز تضمین می‌نماید که برای هر فعالیت تنها فقط می‌توان یک روش اجرا را برگزید. از سوی دیگر زمان پایان پروژه نیز براساس رابطه (۸) با پایان یافتن آخرین فعالیت تعیین خواهد شد.

۲.۲. الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب NSGA-II

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA) نخستین بار توسط اسرینیواس و دب برای حل مسائل بهنیه‌یابی چند هدفه بر پایه رتبه‌بندی جواب‌ها در سال ۱۹۹۴ ارائه شد [۱۶]. در این روش فضای جستجو طی فرآیند رتبه‌بندی کاوش می‌شود. این روش حساسیت قابل توجهی نسبت به پارامترهای GA داشته و این مهم سبب شد تا دب و همکاران در سال ۲۰۰۰ نسخه دوم الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب را با عنوان NSGA-II ارائه دهند. در NSGA-II با تعریف مفاهیم نخبه‌گرایی و فاصله ازدحام، کیفیت جستجوی فضای طراحی و نیز سرعت الگوریتم افزایش یافته است [۱۷]. بدین‌ترتیب در این روش براساس مفهوم رتبه، جواب‌های موجود مبتنی بر سطح غیرمغلوب، مرتب می‌شوند. جواب غیرمغلوب، پاسخی است که براساس آن امکان بهبود یکی از توابع هدف، تنها با بدتر شدن حداقل یکی دیگر از توابع هدف مسئله بهینه‌یابی امکان‌پذیر باشد. همچنین هیچ پاسخی نمی‌تواند بر جواب غیرمغلوب غلبه نماید. بنابراین برای رتبه‌بندی ابتدا از بین اعضای جمعیت که با نام کروموزوم شناخته می‌شوند، پاسخ‌های غیرمغلوب شناسایی و در سطح اول با نام A_1 دسته‌بندی می‌شوند. این پاسخ‌ها از جمعیت خارج شده و در ادامه مجددا جواب‌های غیرمغلوب از بین کروموزوم‌های باقیمانده شناسایی و در سطح بعدی یعنی سطح دوم با نام A_2 دسته‌بندی می‌شوند. این فرآیند تا دسته‌بندی کلیه کروموزوم‌ها در سطوح مختلف ادامه می‌یابد. پس از

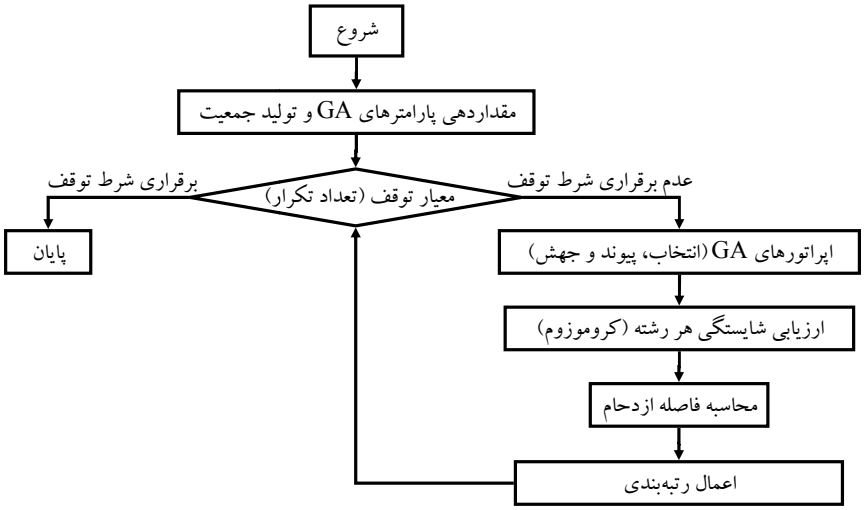
رتبه‌بندی در روش NSGA-II با مفهوم ازدحام و محاسبه فاصله ازدحام، اعضایی از جمعیت که شایستگی بیشتری دارند، در فرآیند تولید نسل مشارکت بالاتری خواهند داشت. به بیان دیگر براساس پدیده ازدحام پاسخ‌های متنوع در بهترین مرز پارتویی درنظر گرفته شده و بدین‌سان کروموزوم‌های مشابه کروموزوم شایسته در نسل بعدی حضور فعال‌تر و موثرتری خواهند داشت. برای محاسبه فاصله ازدحام منتسب به هر نقطه مانند نقطه i بر روی یک جبهه مشخص، نقاط قبل و بعد نسبت به توابع هدف مسئله انتخاب و بشرح روابط زیر محاسبه می‌گردد [۱۵-۱۴].

$$d_1^i = \frac{\left|F_1^{i+1} - F_1^{i-1}\right|}{F_1^{\max} - F_1^{\min}} \tag{9}$$

$$d_2^i = \frac{\left|F_2^{i+1} - F_2^{i-1}\right|}{F_2^{\max} - F_2^{\min}} \tag{10}$$

$$d_i = d_1^i + d_2^i \tag{11}$$

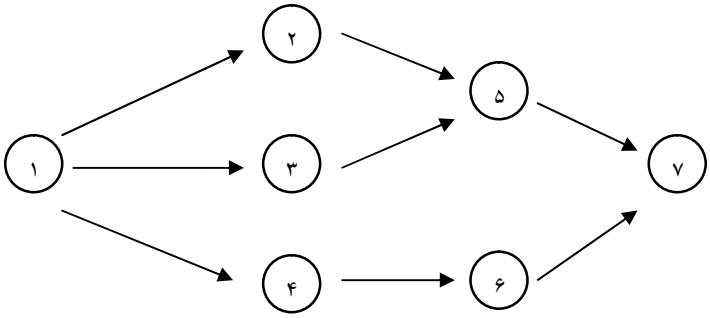
در روابط فوق F^{max} و F^{min} به ترتیب دلالت بر حداکثر و حداقل توابع هدف بر روی سطح مودنظر دارد. هر چه فاصله ازدحام بیشتر باشد، ناحیه بزرگتری در فضای طراحی جستجو می‌شود و تنوع پاسخ‌ها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر هر چه فاصله ازدحام کمتر باشد، مفهوم نخبه‌گرایی و شایسته‌سالاری افزایش می‌یابد. بدین‌ترتیب براساس فرآیند ازدحام الگوریتم NSGA-II فضای کاوش را به صورت هوشمندانه برای یافتن رشته‌های شایسته جستجو می‌نماید. برای نیل به این هدف ابتدا جمعیت اولیه با نام P_t بصورت تصادفی تولید می‌شود. سپس رتبه‌بندی جبهه‌ها انجام و به هر جبهه شایستگی معادل رتبه جبهه اختصاص داده می‌شود. در گام بعدی با اعمال اپراتورهای GA همچون انتخاب (روش مسابقه‌ای)، پیوند (پیوند تک نقطه‌ای) و جهش، جمعیت جدیدی با نام Q_t تولید می‌شود [۱۸]. حال جمعیت P_t و Q_t با یکدیگر ادغام شده و جمعیت R_t با تعدادی دو برابر جمعیت اولیه تولید می‌شود. در ادامه رتبه‌بندی غیرمغلوب بر روی جمعیت R_t اعمال و کروموزوم‌ها در جبهه‌های A_i دسته‌بندی خواهد شد. در ادامه با محاسبه فاصله ازدحام رتبه‌بندی کروموزوم‌های واقع در جبهه iام انجام و کروموزوم‌ها بصورت نزولی مرتب خواهند شد. بدین‌ترتیب یک حلقه از فرآیند تکرای روش NSGA-II صورت می‌پذیرد. شکل ۲ کلیات فرآیند بهینه‌یابی براساس NSGA-II را نمایش می‌دهد.



شکل ۲ – الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب

۲. مثال عددی

جهت بررسی عملکرد روش NSGA-II مثال عددی از یک پروژه عمرانی با اقتباس از مرجع [۲] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مثال نوع شبکه زمان‌بندی از نوع روش مسیر بحرانی درنظر گرفته شده است. از سوی دیگر این پروژه دارای هفت فعالیت می‌باشد که بصورت گره‌ای هر فعالیت با فعالیت قبلی بشرح شکل ۳ ارتباط دارد.



شکل ۳ – نمودار فعالیت های پروژه

هزینه غیرمستقیم برای پروژه برابر ۱۵۰۰ دلار به ازای هر روز است. جدول ۱ جزئیات هزینه براساس واحد پولی دلار و زمان به ازای روز برای فعالیت‌های پروژه به ازای حالات مختلف و ممکن نشان می‌دهد [۲].

جدول ۱- فعالیت های پروژه به ازای حالات مختلف

فعالیت	پیشنیاز	زمان حالت ۱	هزینه حالت ۱	زمان حالت ۲	هزینه حالت ۲	زمان حالت ۳	هزینه حالت ۳	زمان حالت ۴	هزینه حالت ۴	زمان حالت ۵	هزینه حالت ۵
۱	--	۱۴	۳۳۰۰۰	۲۰	۱۸۰۰۰	۲۴	۱۲۰۰۰	--	--	--	--
۲	۱	۱۵	۳۰۰۰	۱۸	۲۴۰۰	۲۰	۱۸۰۰	۲۳	۱۵۰۰	۲۵	۱۰۰۰
۳	۱	۱۵	۴۵۰۰	۲۲	۴۰۰۰	۳۳	۳۲۰۰	--	--	--	--
۴	۱	۱۲	۴۵۰۰۰	۱۶	۳۵۰۰۰	۲۰	۳۰۰۰۰	--	--	--	--
۵	۳ و ۲	۲۲	۲۰۰۰۰	۲۴	۱۷۵۰۰	۲۸	۱۵۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰۰	--	--
۶	۴	۱۴	۴۰۰۰۰	۱۸	۳۲۰۰۰	۲۴	۱۸۰۰۰	--	--	--	--
۷	۵ و ۶	۹	۳۰۰۰۰	۱۵	۲۴۰۰۰	۱۸	۲۲۰۰۰	--	--	--	--

بر این اساس همان‌طور که مشاهده می‌شود، فعالیت‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۷ هر کدام به سه حالت ممکن با زمان و هزینه‌های مختلف قابل انجام می‌باشد. همچنین فعالیت ۲ به پنج حالت ممکن و فعالیت ۵ به چهار حالت ممکن با زمان و هزینه‌های مختلف قابل انجام است. این در حالی است که پیشنیازی هر فعالیت در پروژه نیز می‌بایست رعایت شود. از سوی دیگر مقادیر پارامترهای روش NSGA-II نیز طی فرآیند سعی و خطا درنظر گرفته شده است. بر این اساس مقادیر تعداد جمعیت اولیه و نیز تعداد تکرار بترتیب برابر ۱۰۰ و ۲۰۰ منظور می‌شود. همچنین مقادیر نرخ پیوند و جهش نیز بترتیب برابر ۰/۹ و ۰/۰۱ لحاظ شده است. نتایج حاصل از روش NSGA-II در مقایسه با روش‌های الگوریتم ساده CPM و روش‌های بهینه‌یابی IP و GA بشرح جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲- مقایسه نتایج فرآیند بهینه‌یابی

	روش	زمان بر حسب روز	هزینه به دلار
تحقیق حاضر	NSGA-II	۶۰	۲۲۰۵۰۰
[۲]	CPM	۶۰	۲۲۱۶۲۴/۷
	IP	۶۳	۲۱۸۵۰۰
	GA	۶۳	۲۲۰۴۰۰
		۶۳	۲۱۸۵۰۰
		۶۷	۲۲۲۳۰۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش NSGA-II با کاوش بهتر فضای جستجو، نتایج مناسب‌تری را ارائه داده است. بدین‌ترتیب پروژه با زمان کمتر و هزینه معقول قابل انجام می‌باشد. ارزیابی نسل‌های تکرار در الگوریتم NSGA-II دلالت بر همگرایی مناسب در عین تنوع پاسخ‌ها دارد. این روش با استفاده از دو مفهوم رتبه‌بندی و محاسبه فاصله ازدحام فضای کاوش را بصورت هوشمندانه‌ای جستجو و تکامل پی در پی نسل‌ها را برای هر دو تابع هدف در پیش می‌گیرد. بررسی میانگین کروموزوم‌های آخرین نسل از فرآیند تکرار تاییدی بر این مهم است. میانگین تعداد روزها و مقدار هزینه برای کروموزوم‌های آخرین نسل بترتیب برابر ۶۶ روز و ۲۲۸۳۱۳ دلار می‌باشد. این اعداد با مقدار بهترین کروموزوم در آخرین نسل اختلاف اندکی دارند و این مسئله سیر همگرایی الگوریتم به سمت جواب مناسب را نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده گردید، مسئله زمان و هزینه در پروژه‌های عمرانی امری مهم و ضروری است که با توجه به ارتباط این دو عامل، می‌بایست طرح مسئله بهینه‌یابی زمان – هزینه صورت پذیرد. بر این اساس در مقاله حاضر ضمن بررسی تاثیر این دو عامل، روابط TCO شرح و مسئله با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب ارزیابی گردید. برای این منظور از یک مسئله هفت فعالیتی که یک پروژه عمرانی می‌باشد، بهره گرفته شد. نتایج دلالت بر عملکرد مناسب روش NSGA-II نسبت به سایر روش‌های بهینه‌یابی فراابتکاری و نیز کلاسیک دارد. این روش با کاوش بهتر فضای جستجو پاسخ مناسبی برای دو تابع زمان و هزینه نتیجه داده است. استفاده از دو مفهوم رتبه‌بندی و نیز فاصله ازدحام در روش NSGA-II سبب تنوع جواب در نسل‌های متوالی و نیز افزایش سرعت همگرایی الگوریتم شده است. بدین‌ترتیب دو فاکتور تنوع و تشدید که از عوامل اساسی الگوریتم‌های فراابتکاری است، در فرآیند حل مسئله TCO با استفاده از روش NSGA-II مشاهده می‌شود. بررسی نسل‌های متعددی از فرآیند تکرار در روند بهینه‌یابی بویژه آخرین نسل، بیانگر این مهم است. بدین‌ترتیب توصیه می‌شود که ضمن طرح مسئله بهینه‌یابی زمان و هزینه برای پروژه‌های عمرانی، روش NSGA-II می‌تواند الگوریتم مناسبی برای نیل به طرحی مناسب باشد. باید توجه داشت که حتی در پروژه‌های عمرانی با فضای طراحی کوچک هم، طرح مسئله TCO از اهمیت بالایی برخوردار بوده و ضروری است.

۵. مراجع

1. Zheng, X.M.D, Ng, S.T. and Kumaraswamy, M.M. (2005), “Applying Pareto Ranking and Niche Formation to Genetic Algorithm-Based Multiobjective Time-Cost Optimization,” Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, **131** (1), pp 81-91.
2. Zheng, X.M.D, Ng, S.T. and Kumaraswamy, M.M. (2002), “Applying Genetic Algorithm Techniques For Time-Cost Optimization,” 18th Annual ARCOM Conference, **2** (1), pp 801-810.
3. Haj, R.A.A. and El-Sayegh, S.M. (2015), “Time-Cost Optimization Model Considering Float-Consumption Impact,” Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, **141** (5), pp 1-10.
4. Zheng, X.M.D, Ng, S.T. and Kumaraswamy, M.M. (2004), “Applying a Genetic Algorithm-Based Multiobjective Approach for Time-Cost Optimization,” Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, **130** (2), pp 168-176.
5. Ebrahimnezhad, S., Ahmadi, V. and Javanshir, H. (2013), “Time-Cost-Quality Trade-off in a CPM1 Network Using Fuzzy Logic and Genetic Algorithm,” International Journal of Industrial Engineering & Production Management, **24** (3), pp 361-376.
6. Babu, A.J.G. and Suresh, N. (1996), “Project Management with Time, Cost, and Quality Considerations,” European Journal of Operations Research, **88** (2), pp 320-327.
7. Khang, D.B. and Myint, Y.M. (1999), “Time, Cost and Quality Trade-off in Project Management,” International Journal of Project Management, **17** (4), pp 249-256.
8. Feng, C.W., Liu, L. and Burns, S.A. (1997), “Using Genetic Algorithm to Solve Construction Time-Cost Trade-Off Problems,” Journal of Computing in Civil Engineering, **11** (3), pp 184-189.

9. Ng, S.T. and Zhang, Y. (2008), "Optimizing Construction Time and Cost Using Ant Colony Optimization Approach," Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, **134** (9), pp 721-728.

10. Cristóbal, J.R.S. (2009), "Time, Cost, and Quality in a Road Building Project," Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, **135** (11), pp 1271-1274.

11. Que, B.C. (2002), "Incorporating Practicability into Genetic Algorithm-Based Time-Cost Optimization," Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, **128** (2), pp 139-143.

12. Jalali, F. and Shirvani, F. (2011), "Optimization of Construction Time-Cost Trade-Off on Advances in Science and Analysis Using Genetic Algorithms," 5th Symposium Technology, Khavaran Higher Education Institute, Mashhad, Iran.

۱۳. گلابچی، م. (۱۳۹۷)، "*مدیریت پروژه با رویکرد پروژه های فناوری اطلاعات*"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هفتم، تهران، ایران.

۱٤. ممیزی، ف. و چهارسوقی، س. ک. (۱۳۹۵)، "*برنامه ریزی و کنترل پروژه*"، انتشارات ترمه، چاپ دوم، تهران، ایران.

۱۵. سبزه پرور، م. (۱۳۹۶)، "*مدیریت و کنترل پروژه به روش گام به گام*"، انتشارات ترمه، چاپ بیست و پنج، تهران، ایران.

16. Srinivas, N. and Deb K. (1994), "Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms," Evolutionary computation, **2** (3), pp 221-248.

17. Deb, K., Pratap, A., Agarwal S. and Meyarivan, T.A.M.T. (2002), "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, " IEEE transactions on evolutionary computation, **6** (2), pp 182-197.

۱۸. کلات‌جاری، و. ر.، طالب‌پور، م. ح. و رحیمی، و. (۱۳۹۰)، "بهینه‌یابی سطح‌مقطع و توپولوژی سازه‌ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی تاثیر اپراتورهای پیوند در روند بهینه‌یابی،" مجموعه مقالات ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۷-۶ اردیبهشت.