

طراحی یک مدل هوشمند برای بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی پروژه‌های خطی - تکراری

حسین رضایی^{۱*}، پریسا قبادی^۲، احد نظری^۳ و محمد تقی عیسایی^۴

^۱ کارشناس ارشد مدیریت پروژه و ساخت - دانشکده معماری و شهرسازی - دانشگاه شهید بهشتی
^۲ دانشجوی دکترای مهندسی معدن - دانشکده مهندسی معدن و متالورژی - دانشگاه صنعتی امیرکبیر
^۳ استادیار مدیریت پروژه و ساخت - دانشکده معماری و شهرسازی - دانشگاه شهید بهشتی
^۴ دانشیار مهندسی صنایع - دانشکده اقتصاد و مدیریت - دانشگاه صنعتی شریف
(تاریخ دریافت ۹۱/۱/۲۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۲/۲/۹، تاریخ تصویب ۹۲/۶/۲۴)

چکیده

پروژه‌های خطی - تکراری دسته خاصی از پروژه‌ها هستند که در آنها برخی از فعالیت‌ها در بخش‌ها یا واحدهای مختلف تکرار می‌شود. به دلیل انتقال منابع مربوط به فعالیت‌های مشابه در واحدهای متوالی پروژه، توجه به حفظ پیوستگی کار آنها در برنامه زمان‌بندی این نوع از پروژه‌ها بسیار پر اهمیت است. به همین علت و به دلیل ماهیت متفاوت پروژه‌های مذکور نسبت به پروژه‌های معمول، زمان‌بندی آنها با استفاده از روش‌های معمول مانند روش مسیر بحرانی، بسیار طاقت‌فرسا و زمان‌بر بوده و در عمل مفید نیست. از این رو، در تحقیق حاضر، روش جدیدی برای بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی پروژه‌های خطی - تکراری با هدف کمینه‌کردن زمان یا هزینه پروژه و یا موازنه آنها ارائه شد که در آن، زمان‌بندی پروژه با رعایت روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها و حفظ پیوستگی کار منابع موجود، انجام می‌گیرد. علاوه بر این، روابط مختلف زمان - هزینه (روابط خطی و غیرخطی اعم از پیوسته و گسسته) برای ارائه یک برنامه زمان‌بندی واقع‌گرایانه، در نظر گرفته می‌شود. مزیت دیگر مدل پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین، در مجاز دانستن وقفه‌های کاری مفید حین اجرای برخی فعالیت‌ها، ضمن تمرکز بر حفظ پیوستگی کار منابع کل پروژه است. برای دستیابی به اهداف مذکور در این روش، مناسب‌ترین مقادیر زمان اجرای فعالیت‌ها و تاریخ شروع هر یک از آنها در واحدها یا بخش‌های مختلف، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و یک الگوریتم برنامه‌ریز تعیین می‌شود. برای ارزیابی قابلیت این مدل نیز، یک پروژه نمونه با توابع هدف مختلف زمان‌بندی شد و ضمن بررسی نتایج به دست آمده از زمان‌بندی پروژه مذکور و تحلیل کاستی‌های مدل پیشنهادی در نبود توجه به تأثیر برخی از عوامل دخیل در زمان‌بندی این دسته از پروژه‌ها (مانند نرخ بهره‌وری متغیر منابع و یا امکان اجرای همزمان فعالیت‌های مشابه در واحدهای متوالی)، مدل جدیدی بر اساس روش حاضر و با هدف رفع نواقص آن معرفی می‌شود که در پژوهش بعدی ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پروژه‌های خطی - تکراری، برنامه زمان‌بندی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

مسکونی و موارد مشابه [۱]. شایان ذکر است که عبارت خطی - تکراری استفاده شده در این تحقیق، هر دو دسته پروژه‌های مذکور را در بر می‌گیرد.

در این پروژه‌ها، فعالیت‌ها به طور متوالی تکرار می‌شوند. از طرف دیگر کل پروژه به واحدهای مستقل با اولویت زمانی متفاوت تقسیم می‌شود، به گونه‌ای که زمان تحویل هر یک از آنها می‌تواند متفاوت باشد و اغلب برای کوتاه کردن دوره بازگشت سرمایه، بعضی از واحدها قبل از اتمام کل پروژه به بهره‌برداری می‌رسند. از این رو، زمان‌بندی دقیق این پروژه‌ها با حداقل زمان مرده، بسیار پراهمیت خواهد بود. از سوی دیگر، واحدهای تکراری پروژه باید در یک توالی مشخص پیاده شوند. این توالی

پروژه‌های خطی - تکراری (Linear-Repetitive Projects, LRPs)، بخش عظیمی از پروژه‌ها در دنیای امروز هستند که به دلیل داشتن ماهیت ویژه و متفاوت نسبت به سایر پروژه‌های معمول، از جنبه اقتصادی، فنی، سیاسی و اجتماعی اهمیت بسزایی دارند. واژه خطی، بیانگر پروژه‌ای است که در آن، فعالیت‌ها در یک جریان افقی از قبیل بخش‌های مختلف، تکرار می‌شوند (مانند ساخت بزرگراه‌ها و تونل‌ها، ریل‌گذاری، خطوط لوله، مجاری فاضلاب و غیره). عبارت تکراری نیز پروژه‌ای را توصیف می‌کند که در آن فعالیت‌ها به شکل گسسته در واحدهای مختلف و اغلب به طور عمودی تکرار می‌شوند (مثلاً ساخت برج‌ها، ساختمان‌های بلند مرتبه، مجتمع‌های

در تحقیق حاضر با فرض برقرار بودن پیوستگی درون واحدی، به بررسی اهمیت حفظ پیوستگی کار بین واحدی منابع و تأثیر آن در زمان‌بندی این پروژه‌ها پرداخته می‌شود. شایان ذکر است که رعایت نکردن شرط اجرای پیوسته فعالیت‌های مشابه بین واحدهای متوالی پروژه، باعث ایجاد وقفه بین کارها شده که این موضوع خود منجر به افزایش هزینه‌ها به دلیل بیکار بودن منابع می‌شود [۱ و ۲].

۳) **زمان تکمیل واحدها:** زمان اتمام کار در یک واحد، روی واحدهای قابل تحویل بعدی در پروژه تأثیر گذاشته و تأخیر در آن می‌تواند منجر به صرف منابع مالی قابل توجهی شود، زیرا دوره بازگشت سرمایه پروژه به تحویل واحدهای پیش‌نیازی تکمیل شده در طول مدت زمان پروژه، بستگی دارد. به عبارت دیگر، واحدهای تکمیل شده پروژه را می‌توان قبل از اتمام کل پروژه، مورد بهره‌برداری قرار داد. بنابراین دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر می‌شود [۱].

۴) **تعداد واحدهایی که پروژه به آن تقسیم می‌شود:** هر واحد، هزینه ثابت مشخصی برای نگهداری کارگاه به پروژه تحمیل می‌کند که هزینه کلی پروژه را افزایش می‌دهد. در واقع افزایش تعداد واحدها باعث بهبود جریان نقدینگی آن می‌شود و باید توجه داشت که اگرچه با افزایش تعداد واحدها، زمان کلی پروژه کاهش یافته، ولی این موضوع منجر به افزایش تعداد وقفه‌های کاری، نیاز به منابع بیشتر و در نتیجه هزینه بالاتر برای اجرای پروژه می‌شود [۱-۳].

متغیرهای تصمیم‌گیری، ترکیبی از عوامل بالا بوده و برای رسیدن به یک برنامه زمان‌بندی بهینه باید بین پارامترهای متعدد مورد بررسی، موازنه انجام گیرد.

مروری بر تحقیقات پیشین

در این بخش، به معرفی روش‌های مورد استفاده برای زمان‌بندی پروژه‌های خطی-تکراری و بررسی مزایا و معایب آنها پرداخته می‌شود. این روش‌ها و تکنیک‌ها عبارتند از [۴]:

۱) روش‌های شبکه:

روش مسیر بحرانی (Critical Path Method, CPM)

ممکن است بر اساس قوانین منطقی بوده و یا متناسب با نیاز ساخت ایجاد شود. به عنوان مثال کف واحدها در ساختمان‌های بلند مرتبه باید به طور طبیعی یک واحد روی واحد دیگر ساخته شود. علاوه بر این، داخل هر واحد، فعالیت‌ها نیز تقدم دارند. در واقع برای مثال ذکر شده، باید فعالیت نصب اسکلت قبل از شروع بتن‌ریزی کف تمام شود [۱ و ۲].

منابع LRPs بارها استفاده شده و در واحدهای مختلف پروژه انتقال می‌یابد. بنابراین مدیریت مفید منابع از نظر زمان و هزینه پروژه بسیار مهم بوده و در واقع یک برنامه زمان‌بندی مطلوب برای اطمینان از استفاده بی‌وقفه منابع فعالیت‌های مشابه در بین واحدها، ضروری است [۲ و ۳]. در ادامه ضمن تشریح عوامل دخیل در زمان‌بندی این نوع پروژه‌ها، روش‌های مختلف ارائه شده برای این موضوع، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پارامترهای مؤثر در زمان‌بندی LRPs

زمان‌بندی پروژه‌های خطی-تکراری، در عمل پیچیده بوده و عوامل بسیاری در آن دخیل است. پارامترهای زیر، مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که در فرآیند تصمیم‌گیری برنامه‌ریزان هنگام زمان‌بندی این پروژه‌ها مؤثر هستند.

۱) **زمان اتمام پروژه:** زمان پروژه یک عامل کلیدی است. زیرا این پارامتر، از یک سو عملکرد مالی پروژه (از نظر تجاوز از حد مجاز هزینه‌ها، جریمه‌ها و...) و از سوی دیگر، اعتبار سازمان اجرایی پروژه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱].

۲) **پیوستگی کار منابع:** دو نوع محدودیت برای منابع وجود دارد، محدودیت مربوط به دسترسی و محدودیت مربوط به پیوستگی کار. محدودیت دسترسی منابع، بیانگر تعداد محدود منابع در دسترس برای انجام کار در طول یک دوره مشخص است. اما در بیان محدودیت پیوستگی کار منابع در پروژه‌های خطی-تکراری، علاوه بر توجه به حفظ پیوستگی کار درون واحدی (استفاده پیوسته از منابعی که از زمان شروع به کار تا لحظه ترک یک واحد باید بدون وقفه کار کنند)، بر پیوستگی کار بین واحدی (انتقال پیوسته منابع بین واحدهای مختلف) نیز تمرکز می‌شود.

روش خط تعادل در اوایل دهه ۱۹۴۰ به منظور مدیریت و کنترل فرآیند تولید در کارخانه‌های صنعتی که فعالیت‌های تکراری داشتند، ارائه شد. هدف اصلی در LOB ایجاد تعادل و هماهنگی بین تعداد نیروی انسانی و ماشین‌آلات بر اساس نرخ پیشرفت فعالیت‌ها است؛ به گونه‌ای که منابع به طور کامل به کار گرفته شود. از جمله محدودیت‌های LOB عبارتند از [۸ و ۹]:

✓ در LOB نرخ پیشرفت فعالیت‌ها ثابت فرض می‌شود. این فرض که بیانگر مقدار کار یکسان برای فعالیت‌های مشابه در همه واحدها و ثابت بودن مقدار منابع استفاده شده برای هر فعالیت است، همواره درست نیست.

✓ LRPs علاوه بر فعالیت‌های معمولی و تکراری، اغلب حاوی فعالیت‌های غیرمعمول و غیرتکراری نیز هستند که در نمودارهای تکنیک خط تعادل نمی‌توان آنها را وارد کرد (فعالیت‌های غیرمعمول، فعالیت‌هایی با مقدار کار متفاوت در واحدهای مختلف بوده و فعالیت‌های غیرتکراری، فعالیت‌هایی هستند که فقط در یک واحد از پروژه اجرا می‌شوند) [۴].

✓ از آنجا که LOB، فعالیت‌ها را به گونه‌ای زمان‌بندی می‌کند که باید به طور پیوسته انجام شوند، مزیت حاصل از مجاز دانستن وقفه‌های کاری مفید، قابل دستیابی نخواهد بود.

✓ در حالتی که فعالیت‌های زیادی به طور همزمان انجام می‌شوند، نتایج ترسیمی این روش بسیار گیج‌کننده است. زیرا روش مذکور برای پروژه‌های خطی - تکراری ساده طراحی شده است.

لازم به ذکر است که تکنیک خط تعادل یک روش پایه برای زمان‌بندی پروژه‌های خطی - تکراری است و اغلب روش‌های ارائه شده برای زمان‌بندی LRPs نیز بر اساس این تکنیک ایجاد شده‌اند. همچنین اساس مدل ارائه شده در تحقیق حاضر، بر این روش استوار بوده و نتایج به دست آمده نیز در قالب نمودارهایی مشابه نمودار LOB (با اعمال تغییرات) بیان می‌شود.

اگرچه روش‌های گرافیکی، قادر به نشان دادن فعالیت‌های غیرتکراری و غیرمعمول پروژه‌های خطی - تکراری هستند، اما قابلیت آنها نیز به مسائل زمان‌بندی ساده‌شده و پروژه‌های کوچک، محدود است. علاوه بر این، روش‌های مذکور قادر به ارائه تحلیل حساسیت روی نتایج زمان‌بندی نیستند. در نتیجه این روش‌ها نیز نیاز به اصلاح

تکنیک بازنگری و ارزیابی برنامه (Program Evaluation and Review Technique, PERT) روش‌های گرافیکی:

تکنیک خط تعادل (Line of Balance, LOB)
روش تولید عمودی (Vertical Production Method, VPM)
روش زمان‌بندی خطی (Linear Scheduling Method, LSM)
روش زمان‌بندی افقی و عمودی (Horizontal and Vertical Logic Scheduling Method, HVLS)
روش زمان‌بندی تکراری (Repetitive Scheduling Method, RSM)

۳) زمان‌بندی با استفاده از برنامه‌نویسی خطی (Linear Programming, LP)

۴) زمان‌بندی با استفاده از برنامه‌نویسی پویا (Dynamic Programming, DP)

۵) روش‌های نوین مبتنی بر الگوریتم‌های ابتکاری معمول‌ترین روش زمان‌بندی که به دلیل ساده‌سازی زیاد مسئله به طور وسیعی در زمان‌بندی پروژه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، روش مسیر بحرانی است. اما روش مذکور در زمان‌بندی LRPs نواقصی دارد که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

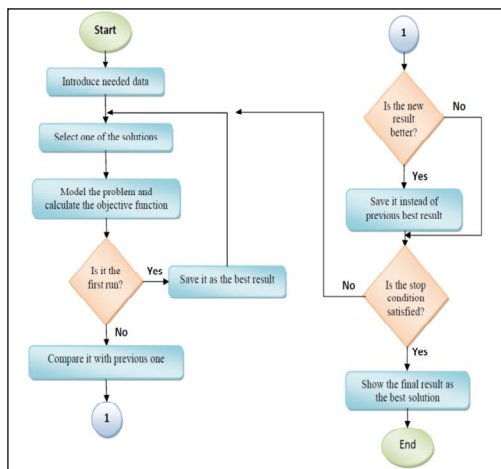
✓ CPM اغلب فقط روی زمان تمرکز می‌کند، در حالی که اکثر پروژه‌های موفق، حاصل مدیریت خوب زمان، هزینه و منابع پروژه به طور همزمان هستند [۵].

✓ CPM قادر به حذف زمان‌های مرده نیست. زیرا در این روش، فعالیت‌ها بر اساس زودترین زمان شروع (یا دیرترین زمان شروع) زمان‌بندی می‌شوند و برای اجرای پیوسته یک فعالیت در واحدهای مختلف هیچ تمهید خاصی در نظر گرفته نشده است [۴ و ۶].

✓ CPM و اطلاعات ترسیمی آن (شبکه) برای پروژه‌های خطی - تکراری با تعداد زیاد واحدها مفید نیست. زیرا محاسبات آن بسیار طاقت‌فرسا و زمان‌بر خواهد بود [۶].

لازم به ذکر است که معایب استفاده از روش PERT برای پروژه‌های مذکور نیز، مشابه نواقص CPM است. در این روش نیز زمان‌بندی فقط بر اساس زمان بوده و نتایج نهایی در قالب شبکه‌های معمول پیش‌نیازی ارائه می‌شود. همچنین به شروط مربوط به کار منابع توجه نمی‌شود [۷].

- (۱) تعریف داده‌های ورودی (مانند تعداد واحدها یا بخش‌ها، تعداد فعالیت‌ها در هر واحد، زمان و هزینه اجرای واحد کار لازم برای هر فعالیت، مقدار کار لازم برای هر فعالیت در واحدهای مختلف، ترکیب‌های ممکن منابع، گزینه‌های مختلف اجرایی هر فعالیت و موارد مشابه).
- (۲) انتخاب یکی از پاسخ‌های ممکن (با توجه به اینکه از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله استفاده می‌شود، بنابراین بر اساس تکنیک جستجوی تصادفی، یکی از دسته‌های مربوط به زمان اجرای فعالیت‌ها برای مدل‌سازی و حل مسئله انتخاب می‌شود).
- (۳) مدل‌سازی مسئله و محاسبه مقدار تابع هدف برای تعیین برنامه زمان‌بندی بهینه.
- (۴) مقایسه برنامه زمان‌بندی به دست آمده با برنامه زمان‌بندی قبلی بر اساس مقدار تابع هدف (در صورتی که عملیات در مرحله اول انجام شود، برنامه زمان‌بندی به عنوان بهترین برنامه به دست آمده، ذخیره می‌شود. در غیر این صورت با برنامه قبلی مقایسه شده و در صورت بهتر بودن، جایگزین برنامه زمان‌بندی قبلی می‌شود).
- (۵) بررسی شرط توقف عملیات (شرط توقف می‌تواند رسیدن به مقدار مشخصی برای تابع هدف، تعداد تکرار مشخص و یا تغییر نکردن مقدار تابع هدف در تعدادی از تکرارهای عملیات باشد). در صورتی که شرط توقف برآورده شده باشد، بهترین برنامه به عنوان برنامه زمان‌بندی بهینه معرفی می‌شود. در غیر این صورت، برای تکرار عملیات و اجرای دوباره فرایند بالا، یک راه-حل ممکن دیگر انتخاب می‌شود.



شکل ۱: شمای کلی مدل پیشنهادی برای زمان‌بندی LRP

داشته و بر همین اساس، روش‌های گرافیکی مدل‌سازی شده ارائه شد که برای حل آنها از تکنیک‌های برنامه‌نویسی خطی و پویا استفاده شد [۲، ۴ و ۱۰]. استفاده از تکنیک‌های ریاضی ذکر شده، یک پیشرفت پراهمیت در زمان‌بندی پروژه‌های خطی - تکراری محسوب می‌شود. اما این روش‌های گرافیکی مدل‌سازی شده نیز محدود به روابط خطی بوده و بنابراین قادر به مدل‌سازی روابط غیرخطی زمان - هزینه و سایر شروط واقعی غیرخطی موجود در این پروژه‌ها نیستند. از سوی دیگر با افزایش حجم پروژه و تعداد جواب‌های ممکن برای مسئله، روش‌های بالا در جواب‌های بهینه محلی گیر افتاده و نمی‌توانند برنامه زمان‌بندی بهینه را ارائه کنند [۱ و ۲]. از این رو، از الگوریتم‌های ابتکاری به عنوان یک وسیله قدرتمند در یافتن بهترین جواب در فضای پاسخ وسیع و پراگتاش برای دستیابی به برنامه زمان‌بندی بهینه استفاده شد [۵ و ۱۱].

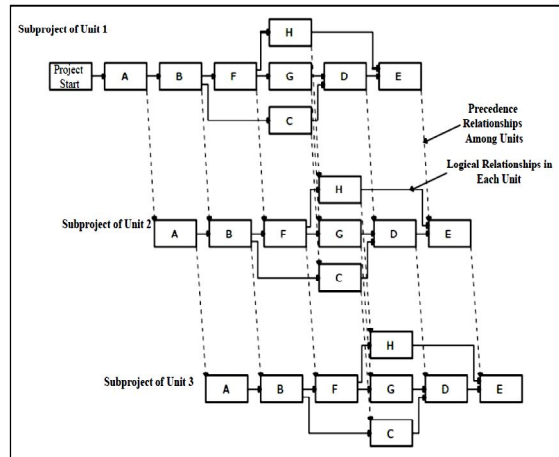
در اغلب تحقیقات انجام شده بر اساس الگوریتم‌های ابتکاری نیز به مسئله زمان‌بندی پروژه‌های خطی - تکراری بدون در نظر گرفتن عوامل اصلی دخیل در زمان‌بندی آنها مانند موازنه زمان - هزینه (با بررسی روابط غیرخطی بین آنها و مقادیر مختلف کار برای فعالیت‌های مشابه در واحدهای مختلف) پرداخته شده است. از این رو در تحقیق حاضر، برای زمان‌بندی LRP از الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm, GA) به عنوان یک روش جستجو با قابلیت بالا در ارائه دسته‌ای از جواب‌های مناسب در اطراف جواب بهینه در یک زمان قابل قبول، استفاده شد. در واقع، با تلفیق این الگوریتم با یک الگوریتم برنامه‌ریز، مدلی هوشمند برای بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی این دسته از پروژه‌ها ارائه شد که در ادامه به تشریح روند مدل‌سازی مسئله و چگونگی حل آن پرداخته می‌شود.

روش تحقیق

در تحقیق حاضر با توجه به ماهیت و اهداف مسئله، از یک روش کمی کاملاً ساختار یافته در قالب یک مدل مفهومی برای بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی پروژه‌های خطی - تکراری استفاده شده است که با توجه به شکل

(۱)، مراحل زیر را در بر می‌گیرد:

پروژه اجرا نمی‌شود که این موضوع جزء ویژگی‌های خاص مدل پیشنهادی محسوب شده و در تحقیقات پیشین در نظر گرفته نشده است.



شکل ۲: توالی فعالیت‌ها با اعمال روابط منطقی در یک پروژه ۳ واحدی

زمان انجام مقدار واحد کار مورد نیاز برای فعالیت i (d_i) برای تعریف مدت زمان لازم برای انجام مقدار واحد کار فعالیت، باید بر اساس دانش خبرگان، مستندات پروژه‌های پیشین و با توجه به منابع در دسترس، حداقل و حداکثر مقدار ممکن برای این پارامتر به عنوان بازه زمانی محتمل، برآورد شود و یا مقادیر مختلف در حالات متفاوت ارائه شود.

هزینه مستقیم به ازای واحد کار لازم برای فعالیت i (c_i) مقدار c_i به زمان مورد نیاز برای انجام مقدار واحد کار فعالیت i بستگی دارد. بنابراین، در روش پیشنهادی c_i تابعی از d_i است. از این رو، c_i یک نیروی کار مشخص برای انجام یک فعالیت معلوم در هر واحد، یکسان خواهد بود. البته مقادیر مختلف d_i ها برای ترکیب‌های متفاوت پرسنلی یک فعالیت، c_i های مختلفی دارند.

رابطه زمان- هزینه برای مقدار واحد کار

بر اساس حالت‌های مختلف (روش‌های متفاوت ساخت، گزینه‌های مختلف تجهیزات یا ماشین‌آلات، تعداد پرسنل در ترکیب‌های مختلف و ...) روابط پیوسته یا گسسته بین هزینه مستقیم c_i و زمان واحد کار d_i در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که چندین گزینه مختلف ساخت برای اجرای فعالیت وجود داشته و هر گزینه، روش معینی

در ادامه این بخش، به طور مفصل روند مدل‌سازی فرآیند زمان‌بندی این پروژه‌ها و نحوه محاسبه تابع هدف به عنوان معیاری برای ارزیابی مطلوب بودن برنامه زمان‌بندی شرح داده می‌شود. در ابتدا پارامترهای اولیه مورد نیاز برای مدل‌سازی برنامه زمان‌بندی معرفی شده و سپس ضمن معرفی توابع هدف، نحوه مدل‌سازی مسئله تشریح می‌شود.

معرفی داده‌های ورودی مسئله

زمان‌بندی پروژه‌های خطی- تکراری ابتدا مستلزم تعریف همه اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله است. از این رو، در این بخش به تعریف هر یک از پارامترها و عوامل مذکور پرداخته می‌شود.

تعداد واحدها- بخش‌های پروژه و تعداد فعالیت‌هایی که در هر واحد- بخش اجرا می‌شود

برای زمان‌بندی این پروژه‌ها ابتدا باید تعداد واحدهای پروژه و نیز تعداد فعالیت‌هایی که در هر یک از واحدهای متوالی اجرا می‌شوند، به عنوان داده ورودی مسئله توسط برنامه‌ریز تعیین شود. در واقع پروژه‌ای با P فعالیت در نظر گرفته می‌شود که این فعالیت‌ها در N واحد یا بخش تکرار می‌شوند. البته ممکن است برخی از فعالیت‌ها در یک یا چند واحد اجرا نشوند. هر فعالیت با یک گره در شبکه، نمایش داده می‌شود که شبکه‌ای با P گره، بیانگر P فعالیت با رعایت روابط پیش‌نیازی بین آنها است (از شروع تا پایان پروژه) و این شبکه برای N واحد تکراری ارائه می‌شود. شکل (۲) یک شبکه نمونه را نشان می‌دهد که در آن ۸ فعالیت در ۳ واحد اجرا می‌شوند. در شکل، روابط پیش‌نیازی درون واحدی فعالیت‌ها، با خطوط ممتد و روابط پیش‌نیازی بین واحدها، با خط چین نمایش داده شده است.

مقدار کار لازم برای اجرای فعالیت i در واحد j (W_{ij})

مقدار کل کار مورد نیاز برای فعالیت i در واحد j ام پروژه با W_{ij} نشان داده می‌شود (i شماره فعالیت بوده و مقدار آن از ۱ تا P تغییر می‌کند. j نیز شماره واحدهای پروژه از ۱ تا N است). شایان ذکر است که هر فعالیت به طور حتم در همه واحدها اجرا نمی‌شود. بنابراین $W_{ij}=0$ بیانگر شرایطی است که در آن، فعالیت i در واحد j ام

سایر پارامترهای اولیه

از جمله اطلاعات دیگری که برای زمان‌بندی پروژه‌ها مورد نیاز است، می‌توان به مواردی مانند ترکیب‌های مختلف پرسنلی و گزینه‌های ممکن ساخت برای هر فعالیت، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، میزان هزینه غیرمستقیم روزانه پروژه و همچنین درجه اهمیت کاهش زمان و یا هزینه پروژه، در مقایسه با هم، اشاره کرد که توسط مدیر پروژه با توجه به شرایط حاکم بر پروژه و ملاحظات قراردادی، اعمال می‌شود.

مدل‌سازی مسئله

پس از معرفی متغیرها و پارامترهای اولیه، شروط مسئله و تابع هدف آن در قالب فرآیند مدل‌سازی تعریف می‌شود که در ادامه به نحوه انجام این فرآیند پرداخته می‌شود.

شروط مسئله

شروط مسئله عبارتند از شروط مربوط به موارد زیر:

✓ زمان لازم برای انجام مقدار واحد کار فعالیت i (d_i)

اگر رابطه بین هزینه مستقیم و زمان لازم برای انجام فعالیت i یک تابع پیوسته باشد، آنگاه:

$$d_i^{Min} \leq d_i \leq d_i^{Max} \quad i = 1, \dots, P \quad (1)$$

در این رابطه، d_i^{Min} و d_i^{Max} به ترتیب حداقل و حداکثر زمان اجرای مقدار واحد کار فعالیت i با توجه به ترکیب‌های ممکن منابع هستند. اما اگر رابطه زمان - هزینه گسسته باشد، آنگاه:

$$d_i = d_i^k \cdot B_i^k \quad i = 1, \dots, P \quad k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K B_i^k = 1 \quad (3)$$

که در آن d_i^k زمان انجام واحد کار توسط گزینه k ام است. باید توجه داشت که B_i^k یک متغیر دودویی (صفر و یک) بوده که اگر $B_i^k = 1$ باشد، آنگاه گزینه k ام برای اجرای فعالیت i انتخاب می‌شود و K تعداد گزینه‌های پیشنهادی برای اجرای فعالیت i در پروژه است.

✓ زمان لازم برای اجرای فعالیت i در واحد j ($D_{i,j}$)

بر اساس مقدار کار فعالیت i در واحدهای مختلف ($W_{i,j}$)، می‌توان زمان کل اجرای فعالیت i در واحد j را از رابطه ۴ محاسبه کرد:

را برای فعالیت مورد نظر ارائه کند، که متناظر با یک زمان و هزینه مشخص باشد، روابط مذکور به شکل گسسته بوده و روابط پیوسته برای زمانی است که یک فعالیت با ترکیب‌های مختلفی از پرسنل انجام می‌شود و یا ماشین‌آلات و تجهیزاتی وجود داشته باشد که بتوان زمان و هزینه آنها را در یک محدوده مشخص تعریف کرد.

روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها

برای حفظ توالی منطقی اجرای فعالیت‌ها از نظر اولویت‌بندی درون واحدی و بین واحدی آنها، باید در ابتدای زمان‌بندی، روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها توسط برنامه‌ریز تعریف شود. در تحقیق حاضر، رابطه پایان به شروع (FS) به عنوان روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها تعریف شده است.

دسته‌بندی فعالیت‌ها از نظر نحوه اجرای آنها

در روش پیشنهادی، از نظر مجاز بودن یا نبودن وقفه‌ها در حین انجام کار، فعالیت‌ها به دو دسته α و β تقسیم می‌شوند. این دسته‌بندی توسط مدیر پروژه برای رعایت شروط مربوط به پیوستگی کار منابع، تعیین می‌شود. بر این اساس، فعالیت‌های نوع α فعالیت‌هایی هستند که باید بدون وقفه اجرا شوند تا پیوستگی کار پرسنل یا منابع در آنها حفظ شود. مزیت انتخاب این نوع فعالیت‌ها در کاهش هزینه کلی پروژه به واسطه بیشینه کردن به کارگیری منابع است. از سوی دیگر، در اجرای فعالیت‌های نوع β ، وجود وقفه‌های کاری مجاز بوده و رعایت شرط پیوستگی کار منابع، ضروری نیست. اگر چه این موضوع ممکن است منجر به ایجاد زمان‌های مرده منابع و افزایش هزینه مربوط به آنها شود، اما می‌تواند در کاهش زمان کلی پروژه مؤثر باشد.

در شرایطی، ویژگی نوع α برای فعالیت‌هایی انتخاب می‌شود که جزئیات اجرای فعالیت در قرارداد انجام پروژه ذکر نشده و یا نیاز به اجاره منابع از تأمین‌کنندگان بیرونی باشد. همچنین در مواردی که زمان انتظار ماشین‌آلات و تجهیزات به کار گرفته شده، هزینه‌های زیادی را بر پروژه تحمیل کند، باید اجرای فعالیت، بدون وقفه انجام گیرد. در غیر این صورت، یعنی زمانی که هزینه ناشی از اتلاف زمانی منابع، چندان مهم نیست، فعالیت از نوع β خواهد بود.

متغیرهای تصمیم‌گیری

متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل پیشنهادی عبارتند از: زمان انجام واحد کار فعالیت‌ها d_i ، زمان شروع فعالیت‌ها در واحدهای متوالی $S_{i,j}$ و متغیرهای دودویی B_i^k (مربوط به گزینه‌های ممکن برای اجرای یک فعالیت) که همه آنها مقادیری بزرگ‌تر یا مساوی صفر هستند.

تابع هدف

کمینه‌کردن موارد مختلف زمان پروژه، هزینه پروژه و یا هر دوی آنها، با در نظر گرفتن عوامل اصلی دخیل در زمان‌بندی این نوع از پروژه‌ها، هدف اصلی این مسئله است. با توجه به اهمیت زمان یا هزینه پروژه از دیدگاه مدیر پروژه و بنا به شرایط حاکم بر پروژه، تابع هدف در بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی، می‌تواند به صورت یکی از توابع زیر تعریف شود:

$$(1) \quad T_p \Rightarrow T_p^{Min} \quad \text{کمینه‌کردن زمان کلی پروژه}$$

$$T_p = \text{Max}(F_{i,j}) = \text{Max}(S_{i,j} + D_{i,j}) \quad (12)$$

$$(2) \quad C_p \Rightarrow C_p^{Min} \quad \text{کمینه‌کردن هزینه کلی پروژه}$$

$$C_p = C_D + C_I = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^N C_{i,j} + C_0 + b.T_p \quad (13)$$

در این رابطه، $C_I = C_0 + b.T_p$ هزینه غیرمستقیم پروژه است که با به دست آوردن مقدار زمان پروژه T_p از طریق رابطه ۱۲ و ضرب آن در پارامتر b (هزینه غیرمستقیم به ازاء واحد زمان) و نیز جایگذاری مقدار C_0 (هزینه اولیه) می‌توان مقدار آن را تعیین کرد. $C_D = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^N C_{i,j}$ نیز هزینه مستقیم پروژه است.

(۳) موازنه زمان - هزینه پروژه با کمینه‌کردن تابع TC

$$TC = \left[W_t \cdot \left(\frac{T_p - T_p^{Min}}{T_p^{Min}} \right)^2 + W_c \cdot \left(\frac{C_p - C_p^{Min}}{C_p^{Min}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

که در آن TC تابع هدف بوده و با استفاده از وزن‌های اختصاص یافته توسط مدیر پروژه (W_t, W_c) تعیین می‌شود. این وزن‌ها به ترتیب بیانگر اهمیت نسبی زمان کلی پروژه (T_p) و هزینه کلی پروژه (C_p) هستند. مقادیر W_t و W_c در محدوده $[0, 1]$ بوده و شرط $W_c + W_t = 1$ باید رعایت شود. اگر مدیر فرض را بر این بگیرد که

$$D_{i,j} = d_i \cdot w_{i,j} \quad i = 1, \dots, P, j = 1, \dots, N \quad (4)$$

✓ هزینه مستقیم اجرای فعالیت i در واحد j ($C_{i,j}$)
برای تعیین هزینه اجرای هر فعالیت در واحدهای مختلف پروژه، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$C_{i,j} = c_i \cdot w_{i,j} \quad (5)$$

✓ روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه در هر واحد
بر اساس روابط پیش‌نیازی، فعالیت i در واحد j فقط بعد از اتمام فعالیت پیش‌نیاز خود (t) در آن واحد و در صورت لزوم، با تأخیر زمانی بین این دو فعالیت ($lag_{t,i}$) می‌تواند شروع شود:

$$S_{t,j} + D_{t,j} + lag_{t,i} \leq S_{i,j} \quad t \in \{T\} \quad (6)$$

لازم به ذکر است که در رابطه ۶، $S_{t,j}$ و $D_{t,j}$ به ترتیب زمان شروع و مدت زمان اجرای فعالیت t در واحد j و مجموعه T شامل همه فعالیت‌های پیش‌نیازی فعالیت i است.

✓ دسته‌بندی انواع فعالیت‌ها

اگر فعالیت i از نوع α باشد ($i \in \{\alpha\}$)، زمان شروع و اتمام فعالیت i در واحد j به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{i,j} + D_{i,j} = S_{i,j+1} \quad (7)$$

$$F_{i,j} = S_{i,j} + D_{i,j} \quad (8)$$

اگر فعالیت i از نوع β باشد ($i \in \{\beta\}$)، برای محاسبه زمان‌های شروع و اتمام فعالیت i در واحدهای مختلف، روابط ۹ و ۱۰ استفاده می‌شوند:

$$S_{i,j} + D_{i,j} \leq S_{i,j+1} \quad (9)$$

$$F_{i,j} = S_{i,j} + D_{i,j} \quad (10)$$

شایان ذکر است که اگر پروژه فعالیت‌هایی با ویژگی نوع β داشته باشد، آنگاه کل زمان وقفه‌ها در این فعالیت‌ها که از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود، باید تا حد امکان کوچک باشد.

$$\sum_{i \in \{\beta\}} \sum_{j=1}^{N-1} (S_{i,j+1} - F_{i,j}) \quad (11)$$

را اندازه جمعیت می‌نامند. کروموزوم‌ها در نسل‌های متوالی رمزگشایی شده و کروموزوم‌های فرزند با ازدواج دو کروموزوم والد به واسطه اعمال عملگر همبندی و جهش، تولید می‌شوند. سپس شایستگی هر کروموزوم با محاسبه عملکرد آن با توجه به تابع شایستگی تعیین می‌شوند. کروموزوم‌های با شایستگی بهتر، احتمال بیشتری برای بقا در نسل بعد خواهند داشت. لازم به ذکر است که بهترین جواب در هر نسل، ذخیره شده و بهترین جواب در نسل بعد، در صورت بهتر بودن نسبت به جواب قبلی، جایگزین آن می‌شود و در نهایت، کروموزوم‌های نهایی که بیانگر جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه هستند، پس از چندین نسل تعیین می‌شوند [۱۲].

زمان انجام واحد کار لازم برای فعالیت‌ها (d_i) برای P فعالیت به صورت θ ها در کروموزوم رمزگذاری می‌شوند که هر کروموزوم موجود در جمعیت، شامل P θ بوده و راه‌حل متناظر با جواب تولید شده را ارائه می‌کند. هر کروموزوم با دسته‌ای از رشته‌های دودویی (P زیررشته یا θ نشان داده می‌شود. هر زیررشته باینری حاوی m بیت است که پشت سر هم چیده شده‌اند (طول θ ها می‌تواند متفاوت باشد). بنابراین طول هر کروموزوم برابر با $n=P.m$ است (شکل (۳)). در شکل، هر θ $(X_i(0), X_i(1), \dots, X_i(m-1))$ بیانگر مقدار عددی X_i در محدوده $[0, 2^{m-1}]$ است. مقدار طول θ (m) برای یک متغیر تصمیم‌گیری با توجه به دقت مورد نیاز تعیین می‌شود. به عنوان مثال اگر دامنه متغیر مورد نظر $[d_i^{\min}, d_i^{\max}]$ باشد، می‌توان مقدار m برای این متغیر تصمیم‌گیری را با استفاده از رابطه زیر تا چند رقم اعشار محاسبه کرد:

$$2^{m-1} \leq (d_i^{\max} - d_i^{\min}) \times 10^w \leq 2^m - 1 \quad (15)$$

که در آن w دقت مورد نیاز است. به عنوان مثال اگر دامنه متغیر d_i برابر با $[1, 5]$ بوده و w برابر با ۲ باشد، بنابراین بر اساس رابطه (۱۵) می‌توان m را برابر ۹ قرار داد. در فرآیند GA، برای تعیین d_i ، مقدار $X(i)$ با استفاده از رابطه (۱۶) رمزگشایی می‌شود (تبدیل مبنای دو به ده).

$$X(i) = \sum_{k=0}^{m-1} x_{i(k)} \cdot 2^k \quad (16)$$

اگر رابطه زمان - هزینه برای فعالیت i یک تابع پیوسته در دامنه $[d_i^{\min}, d_i^{\max}]$ باشد، آنگاه مقادیر d_i با استفاده از

C_P مهم‌تر از T_P باشد، بنابراین W_c باید از W_t بزرگ‌تر باشد و بر عکس. در موردی که اهمیت T_P و C_P یکسان است، هر دو مقدار W_c و W_t باید برابر با 0.5 انتخاب شوند. C_P^{\min} و T_P^{\min} مقادیر بهینه ویژه‌ای هستند که به ترتیب با حل مدل متناظر با روابط ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آیند.

حل مدل زمان‌بندی بهینه پروژه‌های خطی - تکراری

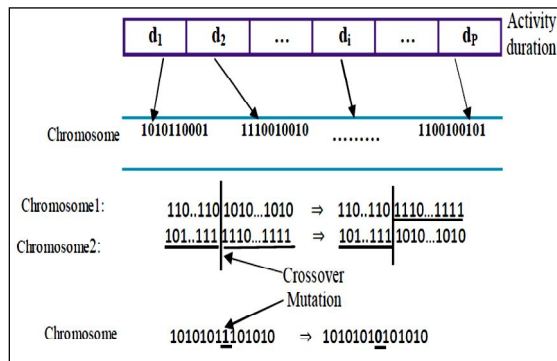
یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی و پیچیده مانند مسئله حاضر را می‌توان با روش‌های برنامه‌نویسی غیرخطی حل کرد. اما باید توجه داشت که حل این مسائل با روش‌های برنامه‌نویسی غیرخطی به دلیل کاوش برای پیدا کردن شروط غیرخطی و متغیرهای تصمیم‌گیری مختلف، از یک سو مشکل و زمان‌بر بوده و از سوی دیگر، احتمال گیر افتادن آنها در نقاط بهینه محلی زیاد است. به همین دلیل در این تحقیق، یک روش جدید ارائه می‌شود که در آن الگوریتم ژنتیک با یک الگوریتم برنامه‌ریز مبتنی بر اصول فیزیکی این نوع از پروژه‌ها تلفیق شده است.

در روش پیشنهادی، از الگوریتم ژنتیک برای تعیین زمان انجام واحد کار لازم برای اجرای فعالیت‌ها استفاده می‌شود. سپس مقدار تابع هدف برای دسته معینی از d_i ها با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریز محاسبه می‌شود. برای بررسی جواب‌های مختلف و تعیین جواب بهینه، باید تابع شایستگی به صورت تابعی از اهداف مسئله باشد که در مدل پیشنهادی به صورت معکوس توابع هدف، در نظر گرفته شده است.

شایان ذکر است که الگوریتم برنامه‌ریز، شامل دو مرحله است (مرحله ۱، زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های با نوع α و مرحله ۲، زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های نوع β). مرحله ۲، دو بخش دارد (مرحله پیش‌رو و مرحله برگشتی) که در ادامه به تفصیل بیان می‌شود.

اجرای الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یک روش جستجوی تکاملی تصادفی است که بر اساس فرآیند تکامل طبیعی بنا شده است. در GA پاسخ‌های ممکن برای یک مسئله، به عنوان جمعیتی از کروموزوم‌ها ارائه شده و هر کروموزوم به شکل یک راه - حل تلقی می‌شود که تعداد کل کروموزوم‌ها در یک مرحله



شکل ۳: شمای کلی کروموزوم و عملگرهای برش و جهش

اجرای الگوریتم برنامه‌ریز

تابع هدف با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریز محاسبه می‌شود. مطلوب این فرآیند، تعیین کمترین مقدار توابع مذکور است؛ با این توضیح که همه شروط مربوط به روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها و پیوستگی کار منابع هنگام استفاده از آنها رعایت شده باشد. برای این کار در هر تکرار از فرآیند GA، فعالیت‌ها با زمان‌های مشخص D_{ij} ، برنامه‌ریزی می‌شوند تا در نهایت برنامه زمان‌بندی بهینه به دست آید. این الگوریتم دارای ۲ مرحله به شرح زیر است.

مرحله ۱: زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های نوع α

هدف در این مرحله، کمینه کردن زمان اتمام پروژه با زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های نوع α به صورت زیر است:

(۱) اگر فعالیت i زیر مجموعه α باشد، آنگاه مقدار بیشینه رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود. سپس مقدار مذکور برای تعیین زمان شروع فعالیت i در واحد j با استفاده از رابطه (۲۱) به کار گرفته می‌شود (شکل ۴):

$$Max = Max \left(\begin{array}{l} 0, F_{t,i} + lag_{t,i}, \\ F_{t,j} - \sum_{j=1}^{j_q-1} D_{i,j} + lag_{t,i} \end{array} \right) \quad (20)$$

✓ اگر فعالیت i در واحد j_q اجرا شود ($D_{i,j_q} \neq 0$)، آنگاه:

$$S_{i,j_q} = \sum_{j=1}^{j_q-1} D_{i,j} + Max \quad j_q = 2, \dots, N \quad (21)$$

$$F_{i,j_q} = S_{i,j_q} + D_{i,j_q} \quad (22)$$

که در آن S_{i,j_q} و F_{i,j_q} به ترتیب زمان شروع و پایان فعالیت i در واحد j_q و t فعالیت پیش‌نیاز فعالیت i است.

رابطه (۱۷) محاسبه شده و c_i با استفاده از رابطه (۱۸) تعیین می‌شود:

$$d_i = d_i^{\min} + X(i) \cdot \left[\frac{d_i^{\max} - d_i^{\min}}{2^m - 1} \right] \quad (17)$$

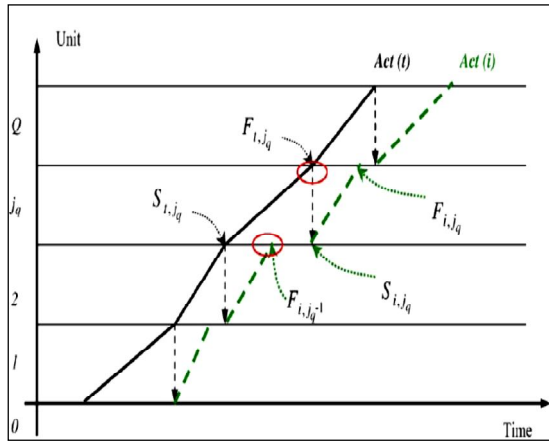
$$c_i = f(d_i) \quad (18)$$

به عنوان مثال از رشته دودویی ۱۰ بیتی (1000110101) برای رمزگذاری d_i در دامنه [1, 6] استفاده می‌شود. تبدیل این رشته باینری به یک عدد واقعی از دامنه [1, 6] در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول رشته باینری (1000110101) با استفاده از رابطه (۱۶) از مبنای ۲ به مبنای ۱۰ برده می‌شود. در این مرحله، مقدار رشته مورد نظر تعیین می‌شود $X(i) = 565$. سپس مقدار واقعی متناظر با این رشته در محدوده [1, 6] برای d_i با استفاده از رابطه (۱۷) به دست می‌آید که برابر با ۳/۶۷ است.

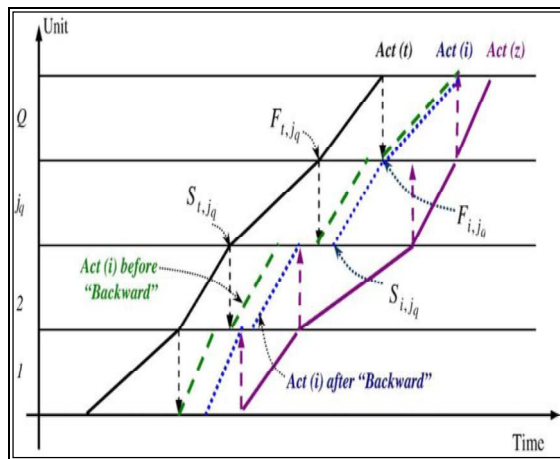
اگر رابطه زمان-هزینه برای متغیر i یک تابع گسسته با k گزینه (گزینه ۱ $\{d_i^1, c_i^1\}$ ، گزینه ۲ $\{d_i^2, c_i^2\}$ ، ... و گزینه k $\{d_i^k, c_i^k\}$) باشد، مقادیر d_i و c_i را می‌توان با استفاده از مقدار $Y(i)$ تعیین کرد که این مقدار از رابطه (۱۹) به دست می‌آید. اگر $k-1 \leq Y(i) \leq k$ باشد، آنگاه گزینه k ام انتخاب شده و مقدار B_i^k برابر ۱ خواهد بود. با مشخص شدن $B_i^k=1$ مقادیر d_i و c_i گزینه k ام انتخاب می‌شود:

$$Y(i) = X(i) \cdot \left[\frac{K}{2^m - 1} \right] \quad (19)$$

GA در مدل پیشنهادی با استفاده از مکانیزم انتخاب مسابقه عملگر برش چهار نقطه‌ای و جهش یکنواخت اجرا می‌شود که در شکل (۳) شمای کلی مکانیزم‌های برش و جهش نشان داده شده است. شایان ذکر است که عملگرهای انتخابی، بر اساس آنالیز حساسیت انجام شده روی نتایج حاصل از شرایط مختلف حل مسئله اتخاذ شد. با تعیین پارامترهای ذکر شده، در نهایت مقادیر بهینه D_{ij} و C_{ij} بر اساس شایستگی پاسخ‌ها به دست می‌آید که در ادامه، نحوه محاسبه تابع شایستگی تشریح می‌شود.



شکل ۵: زمان بندی فعالیت i با ویژگی β در مرحله ۱ الگوریتم برنامه ریز



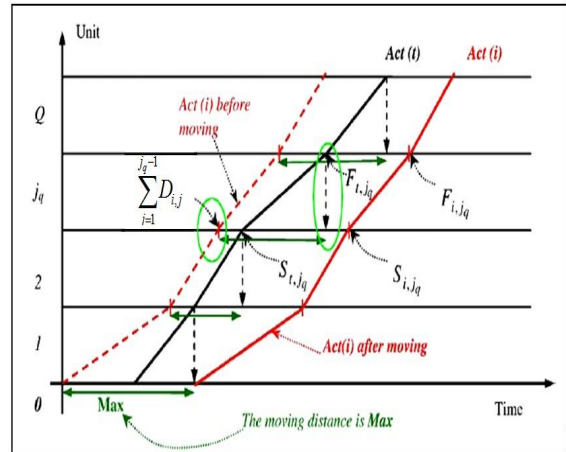
شکل ۶: زمان بندی فعالیت i با ویژگی β در قدم برگشتی مرحله ۲

✓ قدم پیش رو

هدف در قدم پیش رو، کمینه کردن تعداد وقفه‌ها در اجرای فعالیت‌های نوع β است. برای این منظور، برای هر فعالیت نوع β زمان شروع فعالیت i در واحد ۱ ($S_{i,1}$) ثابت در نظر گرفته شده و سپس الگوریتم در جهت کاهش تعداد وقفه‌های فعالیت مذکور در واحدهای دیگر (از واحد ۲ به واحد N) پیش می‌رود و مقدار S_{i,j_q} را به F_{i,j_q-1} تا حد امکان نزدیک می‌کند. اما در صورتی که بعد از انتقال به جلو به دلیل تخطی از روابط پیش‌نیازی، مقدار S_{i,j_q} به مقدار F_{i,j_q-1} متصل نباشد، نمی‌توان فعالیت مذکور را به جلو کشید تا زمان وقفه‌ها در واحد j_q به حداقل برسد. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، چون زمان شروع فعالیت i در این حالت خاص، در

✓ اگر فعالیت i در واحد j_q انجام نشود ($D_{i,j_q} = 0$)، آنگاه:

$$F_{i,j_q} = S_{i,j_q} \quad (23)$$



شکل ۴: زمان بندی فعالیت i با ویژگی α در مرحله ۱ الگوریتم برنامه ریز

✓ اگر فعالیت i زیر مجموعه β است، آنگاه:

در روش پیشنهادی، زمان شروع فعالیت i در واحد j_q با استفاده از رابطه (۲۴) با توجه به شکل (۵) محاسبه می‌شود:

$$S_{i,j_q} = \text{Max}(0, F_{t,j_q} + \text{lag}_{t,i}, F_{i,j_q-1}) \quad (24)$$

$$F_{t,j_q} = S_{i,j_q} + D_{i,j_q} \quad (25)$$

مرحله ۲: زمان بندی بهینه فعالیت‌های نوع β

هدف در مرحله ۲، کمینه کردن زمان وقفه‌ها به واسطه زمان بندی بهینه فعالیت‌های نوع β است که این مرحله شامل دو بخش به صورت زیر است.

✓ قدم برگشتی

در این مرحله، زمان کلی وقفه‌ها برای فعالیت‌های نوع β با شروع کردن تا حد امکان دیرتر این فعالیت‌ها، در همه واحدها کمینه می‌شود. در شکل (۶) این موضوع نشان داده شده است که در آن، فعالیت t پیش‌نیاز فعالیت i و فعالیت z فعالیت پی‌آیندی i است.

در شکل قبل lag ها بیانگر زمان‌های انتظار هستند (به عنوان مثال زمان انتظار بین فعالیت‌ها ۱ و ۲ و فعالیت‌های ۱ و ۶ در واحدهای ۱، ۲، ۳ و ۴، چهار روز بوده، ولی در واحد ۵ هیچ زمان انتظاری وجود ندارد). مدیر پروژه، مشخصه مربوط به فعالیت‌ها مثل α و β را به صورت اطلاعات موجود در جدول (۱) تعریف می‌کند (به عنوان مثال فعالیت ۴ و ۶ از نوع β هستند). روابط بین هزینه مستقیم و زمان لازم برای انجام واحد کار هر فعالیت، می‌تواند گسسته یا پیوسته باشد. هزینه غیرمستقیم روزانه (b) ۵۰۰ واحد پول و هزینه اولیه (C_0) ۴۴۰۰ واحد پول فرض شده است.

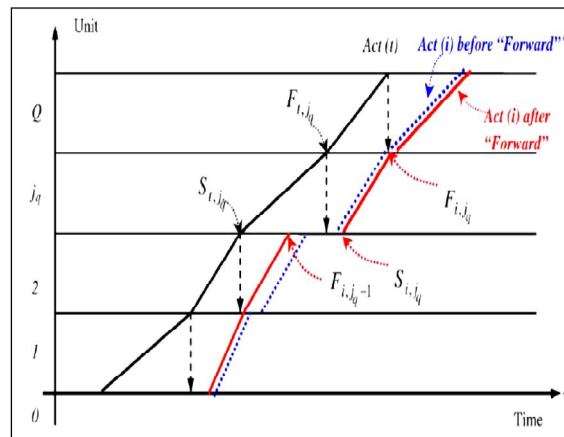
برای زمان‌بندی مسئله، ابتدا زمان فعالیت‌ها را به صورت پیش فرض در مقدار d_i مینیمم قرار داده و پروژه بدون استفاده از موتور جستجوی GA و فقط با الگوریتم برنامه‌ریزی، زمان‌بندی می‌شود. در حالات بعد، برنامه زمان‌بندی بهینه پروژه با هدف کمینه‌کردن زمان پروژه، هزینه پروژه و موازنه آنها با استفاده از مدل پیشنهادی تعیین می‌شود. شایان ذکر است که ضرایب وزنی زمان و هزینه در حالت موازنه این دو عامل به طور یکسان ($W_c=W_t=0.5$) در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، برای مقایسه نتایج به دست آمده از این روش با یک روش مرسوم مثل CPM، این مسئله با روش مسیر بحرانی نیز زمان‌بندی شده و نتایج حاصل از آن ارائه می‌شود.

نتایج کمی

در مورد اول با d_i های مینیمم، برنامه زمان‌بندی به صورت شکل (۹) بوده و زمان اتمام پروژه ۶۱ واحد زمان با هزینه ۱۲۷۶۲۲ واحد پول تعیین شود. در این شکل #i بیانگر شماره فعالیت i است. شایان ذکر است که نمودار زمان‌بندی پروژه در سایر موارد نیز به همین صورت (با تغییرات در مقادیر) خواهد بود که از آوردن دوباره آنها صرف نظر می‌شود.

در حالت دوم که d_i ها به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده و تابع هدف، کمینه‌کردن زمان پروژه بود، حداقل زمان لازم برای اتمام پروژه، ۵۴/۵۸ واحد زمان بوده و هزینه مربوط به آن، ۱۱۰۸۰۴ واحد پول برآورد شد.

واحد مذکور با زمان اتمام آن در واحد قبلی برابر نیست، نمی‌توان آن را به جلو کشید.

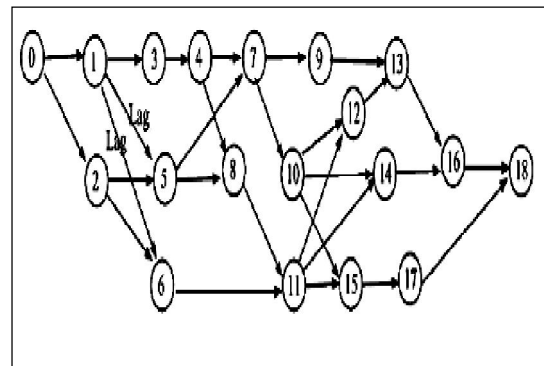


شکل ۷: زمان‌بندی فعالیت i با ویژگی β در قدم پیش رو مرحله ۲

در نهایت برنامه زمان‌بندی پایانی، یک برنامه قطعی مطلوب است که دارای دوره‌های زمانی اجرای فعالیت‌ها D_{ij} و زمان شروع مناسب آنها S_{ij} ، زمان اتمام پروژه (T_p) و یا هزینه کلی آن (C_p) و یا موازنه آنها، به صورت بهینه است.

پروژه نمونه

در ادامه، برای بررسی قابلیت مدل پیشنهادی، یک پروژه پنج واحدی که هر واحد شامل ۱۸ فعالیت است، با داده‌های موجود در جدول (۱) زمان‌بندی می‌شود. همچنین شبکه گره‌ای برای یکی از واحدهای آن در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸: شبکه گرهی زمان‌بندی یک واحد از پروژه نمونه

جدول ۱: داده‌های مربوط به پروژه نمونه

Activity No.	name of activity	Type of activity	Precedence Relationships	Quantity of Work of Activity (i) in Unit (j) (w _{ij})					Time-Cost Relationship
				Unit5	Unit4	Unit3	Unit2	Unit1	
1	Preparing workplace	α	-	5.5	3.5	4.5	1	4.5	$1 \leq d_1 \leq 5, c_1 = 150 - 20d_1$
2	Surveying	α	-	30	0	35	40	30	$0.1 \leq d_2 \leq 0.4, c_2 = 35 - 55d_2$
3	Clearing span	α	1FS	5	10	0	10	5	4 options: {d ₃ , c ₃ } = [{0.4, 180}; {0.6, 160}; {0.8, 135}; {1, 110}]
-	Delay	-	-	0	4	4	4	4	lag=1
4	Blasting	β	3FS	4	3	2	4	2	5 options: {d ₄ , c ₄ } = [{1, 440}; {2, 380}; {4, 340}; {5, 320}; {6, 300}]
5	Excavation	α	1FS+lag, 2FS	0.25	0.5	0.25	0.5	0.25	$4 \leq d_5 \leq 8, c_5 = 3000 - 105d_5 - 26(d_5)^2$
6	Constructing bridge	β	1FS+lag, 2FS	15	20	15	25	10	$0.2 \leq d_6 \leq 0.8, c_6 = 60 - 60d_6$
7	Embankment	α	4FS, 5FS	4	4	3	3	3	$1 \leq d_7 \leq 4, c_7 = 290 - 28d_7 - 7(d_7)^2$
8	Soil transportation	α	4FS, 5FS	2.5	1	1.5	2	1	5 options: {d ₈ , c ₈ } = [{2, 1560}; {3, 1300}; {4, 1000}; {5, 900}; {6, 660}]
9	Sprinkling	α	7FS	2	2	2	2	2	$0.5 \leq d_9 \leq 1.2, c_9 = 360 - 250d_9$
10	Sloping and Flattening	α	7FS	0.5	0.5	0.5	1	0.5	$2 \leq d_{10} \leq 4, c_{10} = 1050 - 185d_{10} - 15(d_{10})^2$
11	Drainage	α	6FS, 8FS	0	2	6	4	4	4 options: {d ₁₁ , c ₁₁ } = [{0.5, 540}; {0.85, 450}; {1, 400}; {1.2, 350}]
12	Compacting	α	10FS, 11FS	2	7	0	6	3	$1 \leq d_{12} \leq 5, c_{12} = 350 - 18d_{12} - 6(d_{12})^2$
13	Prime coat	α	9FS, 12FS	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	$2 \leq d_{13} \leq 5, c_{13} = 550 - 80d_{13}$
14	Asphalt transportation	α	10FS, 11FS	4	2	1	2	4	4 options: {d ₁₄ , c ₁₄ } = [{1, 390}; {2, 300}; {3, 250}; {4, 200}]
15	Guardrail Installation	α	10FS, 11FS	6	6	6	6	6	$0.5 \leq d_{15} \leq 1.6, c_{15} = 315 - 85d_{15} - 30(d_{15})^2$
16	Asphalt lining	α	13FS, 14FS	2	2	2	2	2	$0.5 \leq d_{16} \leq 1, c_{16} = 200 - 160d_{16}$
17	Electrical Installation	α	15FS	1	1	1	1	1	$1 \leq d_{17} \leq 4, c_{17} = 1850 - 390d_{17}$
18	Traffic painting	α	16FS, 17FS	6	6	6	6	6	$0.5 \leq d_{18} \leq 2, c_{18} = 250 - 35d_{18} - 22(d_{18})^2$

زمان متناظر با هزینه‌های مذکور نیز منطقی و قابل قبول خواهد بود.

بحث و نتیجه‌گیری

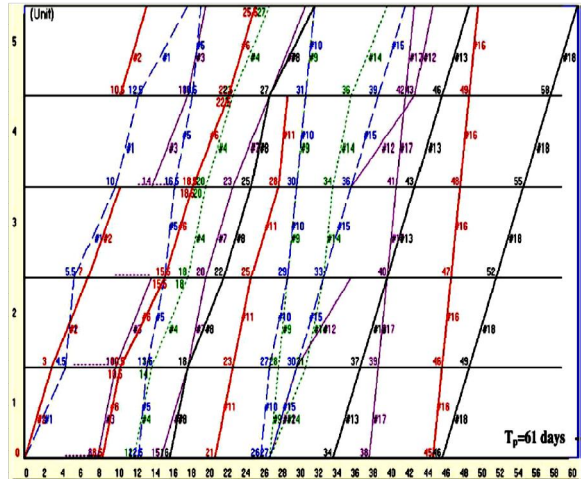
در این تحقیق، یک مدل جدید با به کارگیری الگوریتم ژنتیک برای زمان‌بندی پروژه‌های خطی- تکراری با هدف کمینه‌کردن زمان یا هزینه پروژه و یا موازنه آنها ارائه شد. روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها و پیوستگی کار منابع به عنوان شروط اصلی این مسئله در نظر گرفته شد. همچنین دو نوع ویژگی برای فعالیت‌ها بر اساس مجازبودن وقفه‌های کاری و روابط مختلف بین هزینه مستقیم و زمان انجام فعالیت‌ها (مثل روابط خطی، غیرخطی، پیوسته و یا گسسته) برای تولید یک برنامه زمان‌بندی مطلوب و واقع‌گرایانه مدنظر قرار گرفت. علاوه بر این موارد، در نظر گرفتن مقادیر مختلف کار برای هر یک از فعالیت‌ها در واحدهای مختلف پروژه، مسئله دیگری است که در تحقیقات گذشته لحاظ نشده است، اما در این مدل، مورد توجه قرار می‌گیرد.

برای ارزیابی قابلیت مدل پیشنهادی، یک پروژه نمونه با این روش زمان‌بندی شد و نتایج نشان داد که همواره حداقل زمان انجام واحد کار فعالیت‌ها منجر به اتمام پروژه در کمترین زمان نخواهد شد؛ به گونه‌ای که با حل مدل پیشنهادی، حداقل زمان اتمام پروژه ۵۴/۵۸ واحد زمان است، در حالی که با d_i های مینیمم، پروژه با ۶۱ واحد زمان به اتمام می‌رسد. این موضوع بر انتخاب هوشمندانه d_i ها توسط مدل و به عبارت دیگر، تخصیص هوشمندانه منابع به فعالیت‌های مختلف در محدوده از پیش تعیین شده، دلالت دارد. علاوه بر این، مدل پیشنهادی قادر به حل مسائل زمان‌بندی با روابط غیرخطی پیچیده است. ارائه پاسخ‌های حاصل از حل مدل در قالب نمودارهای ملموس و برنامه‌های زمان‌بندی قابل فهم، استفاده عمومی از آن را ساده کرده و زمان‌های بهینه اجرای هر فعالیت با مقداری بیشتر از مقادیر کمینه ممکن، حفظ و حتی افزایش کیفیت اجرا و کاهش ریسک‌های ناشی از فشرده‌سازی زمان در روش‌های متداول کاهش زمان پروژه‌ها را تضمین می‌کند.

روش پیشنهادی در تحقیقات بعدی

واضح است که در این نوع از پروژه‌ها، به دلیل تکرار یک فعالیت در طول پروژه، نرخ بهره‌وری پرسنل در اجرای

این موضوع نشان‌دهنده این است که بر خلاف تصور و آنچه که در روش مسیر بحرانی در نظر گرفته می‌شود، اعمال حداقل زمان‌های اجرای فعالیت‌ها در یک پروژه خطی- تکراری، منجر به کمترین زمان اجرای پروژه نمی‌شود.



شکل ۹: زمان‌بندی پروژه نمونه با d_i های مینیمم در حالت اول

در مورد سوم نیز d_i ها به عنوان متغیر تصمیم‌گیری فرض شده و تابع هدف، تعیین حداقل هزینه کلی پروژه است که نتیجه آن یک برنامه زمان‌بندی با زمان کلی ۶۳/۵۹ واحد زمان و هزینه کلی ۱۰۳۰۱۹ واحد پول است.

در مورد آخر نیز d_i ها به عنوان متغیر تصمیم‌گیری فرض شده و زمان‌بندی پروژه با تابع هدف موازنه زمان- هزینه انجام گرفته است. در این حالت، زمان اتمام پروژه ۵۹/۳۳ واحد زمان و هزینه کلی آن ۱۰۴۸۰۶ واحد پول برآورد شد.

از زمان‌بندی این پروژه با روش مسیر بحرانی، ۴۳/۵ واحد زمان و ۱۸۰۵۰۰ واحد پول به ترتیب برای زمان و هزینه کلی پروژه به دست آمد. با مقایسه این نتایج با مقادیر به دست آمده از روش پیشنهادی، می‌توان مشاهده کرد که CPM برنامه‌ریزی را در حداقل زمان انجام داده است. اما هزینه‌های پروژه را به گونه‌ای غیرقابل قبول افزایش می‌دهد. بنابراین با استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان به برنامه‌ای مفید برای بهره‌گیری بیشینه از منابع و کمینه‌کردن هزینه‌های پروژه، دست یافت. در حالی که

این‌رو، در تحقیق بعدی، مدل حاضر توسعه داده شده و روش بهبود یافته‌ای ارائه می‌شود که در آن، علاوه بر در نظر گرفتن شروط موجود در این مدل، با در نظر گرفتن مواردی مانند نرخ بهره‌وری متغیر در شرایط نبود اطمینان فازی و انجام همزمان فعالیت‌های مشابه در واحدهای مختلف، زمان‌بندی پروژه‌های خطی - تکراری را می‌توان به نحوی واقع‌بینانه‌تر انجام داد.

سپاسگزاری

نویسندگان برخورد لازم می‌دانند تا بدین وسیله از همه کسانی که در انجام این پژوهش همکاری کرده‌اند، تشکر و قدردانی کنند.

فعالیت، در واحدهای بعدی متغیر خواهد بود. به گونه‌ای که به دلیل پدیده یادگیری، زمان اجرای یک فعالیت به تدریج در واحدهای مختلف کاهش می‌یابد. بنابراین مسئله یادگیری پرسنل و نرخ بهره‌وری متغیر ناشی از آن، باید در برنامه زمان‌بندی لحاظ شود. زیرا توجه به این موضوع در کاهش زمان و به طور طبیعی هزینه غیرمستقیم پروژه، بسیار مؤثر است.

موضوع دیگر، انجام همزمان یک فعالیت در واحدهای متوالی پروژه به واسطه چند دسته پرسنلی (موازی‌کاری) است که یکی دیگر از عوامل مؤثر در کمینه‌کردن زمان اتمام پروژه است و اگر مدل، قابلیت انتخاب هوشمندانه آن را با توجه به موازنه زمان - هزینه داشته باشد، می‌تواند در بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی، نقش بسزایی ایفا کند. از

مراجع

- 1 - Rezaei, H. (2011). *Optimization of linear - repetitive projects scheduling*. M.S thesis, Fac. of architectural and urban design, Shahid Beheshti Uni., Tehran.
- 2 - Ipsilandis, P.G. (2007). "Multiobjective linear programming model for scheduling linear repetitive projects." *ASCE, J. Construction Eng. and Manag.*, Vol. 133, PP. 417-424.
- 3 - Rezaei, H., Ghobadi, P. and Nazari, A. (2011), *6th Cong. of Civil Eng.*, Semnan, Iran.
- 4 - Srisuwanrat, Ch. (2009). *The sequence step algorithm, a simulation- based scheduling algorithm for repetitive projects with probabilistic activity durations*. PhD thesis, Uni. of Michigan, Michigan.
- 5 - Long, L.D. and Ohsato, A. (2009). "A genetic algorithm-based method for scheduling repetitive construction projects." *ASCE, J. of Automation in Construction.*, Vol. 18, PP. 499-511.
- 6 - Suhail, S.A. and Neale, R.H. (1994). "CPM/LOB: new methodology to integrate CPM and line of balance." *ASCE, J. Construction Eng. and Manag.*, Vol. 120, PP. 667-684.
- 7- Hajshirmohamadi, A. (2005). *Project management and control*. 8th. Ed. Chapter 11, Jahad Daneshgahi of Esfahan Uni., Esfahan.
- 8 - Arditi, D. and Albulak, M.Z. (1986). "Line-of-balance scheduling in pavement construction." *ASCE, J. Construction Eng. and Manag.*, Vol. 112, PP. 411-424.
- 9 - Sarraj, Z.M. Al. (1990). "Formal development of line-of-balance technique." *ASCE, J. Construction Eng. and Manag.*, Vol. 116, PP. 689-704.
- 10 - El-Rayes, K. and Moselhi, O. (2001). "Optimizing resource utilization for repetitive construction projects." *ASCE, J. Construction Eng. and Manag.*, Vol. 127, PP. 18-27.
- 11 - Georgy, M.E. (2008). "Evolutionary resource scheduler for linear projects." *ASCE, J. Construction Eng. and Manag.*, Vol. 17, PP. 573-583.
- 12 - Ghobadi, P. (2009). *Optimization of flotation circuits design using a Genetic Algorithm*. M.S thesis, Fac. of Engineering, Shahid Bahonar Uni., Kerman.