Scheduling of construction projects using a combination of multi-objective programming and optimization via simulation

Seyed Mohammad Ali Khatami Firouzabadi *
Associate Professor, Faculty of Management and Accounting, Department of Industrial Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran, a.khatami@atu.ac.ir
Majid Baghery
M.Sc. in Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran, majid_baghery_1987@yahoo.co.uk
Samuel Yousefi
M.Sc. in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran, samuelyousefi@yahoo.com

Abstract:

In the single-mode resource-constrained project scheduling problem, it is assumed that each activity has a specified known execution time and resource consumption can be done only in one way. In practice, there are many cases in which the make span can be reduced by providing additional resources activities. In this case, each activity can be done in one of the procedures, which is called the multi-mode resource-constrained project scheduling. In this paper, the problem includes determination of the basic schedule for the project activities which may be done in several models and the precedence relations are met, While the project make-span, cost and resource fluctuations are minimal. In this research project scheduling problem network will model using ED simulation software and the results of the simulation and a meta-heuristic algorithm has been compared. Finally, management strategies to optimize the scheduling, i.e such minimize total time, cost and resource leveling, will be offered.

Keywords: Project Scheduling, Multi objective program, Simulation, optimization, Metaheuristic

* Corresponding author

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی ۱۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۶
دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷
صص: ۹۸-۸۳

زمان‌بندی پروژه‌های ساخت با استفاده از ترکیب برنامه‌ریزی چندهدفه و بهینه‌سازی از طریق شبیه‌سازی

سید محمدعلی خاتمی فیروزآبادی[۱*]، مجید باقری[۲]، ساموئل یوسفی[۳]

۱- دانشیار، دانشکده مدیریت و حسابداری، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران، a.khatami@atu.ac.ir
۲- کارشناس‌ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران، majid_baghery_1987@yahoo.co.uk
۳- کارشناس‌ارشد مهندسی صنایع، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، samuelyousefi@yahoo.com

چکیده: در مسأله برنامه‌ریزی پروژه با محدودیت منابع تک‌حالت اجرا، فرض بر این است که هریک از فعالیت‌ها دارای زمان اجرای مشخص و مصرف منابع معلوم هستند و تنها به یک روش انجام می‌شوند؛ اما در عمل موارد بسیاری وجود دارد که در آن‌ها می‌توان با فراهم‌کردن منابع بیشتر، زمان فعالیت را کاهش داد. در این حالت، هر فعالیت می‌تواند به یکی از روش‌های اجرایی ممکن انجام شود و مسئلهٔ حاصل، زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالته (MRCPSP) نامیده می‌شود. در این تحقیق، مسئلهٔ زمان‌بندی پروژهٔ منابع محدود با فعالیت‌های چندحالته، شامل تعیین زمان‌بندی پایهٔ فعالیت‌های پروژه است که می‌تواند در چندین حالت انجام شود و روابط پیش‌نیازی را رعایت کند؛ درحالی‌که زمان پروژه، هزینه و نوسانات منابع را کمینه می‌سازد. در این پژوهش، مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با استفاده از ابزار شبیه‌سازی شبکهٔ کنترل پروژه، وارد نرم‌افزار شبیه‌سازی (ED) می‌شود و خروجی‌های آن با خروجی‌های حاصل از یک الگوریتم فراابتکاری مقایسه می‌شود. درنهایت، راهکارهای مدیریتی به‌منظور بهینه‌سازی زمان‌بندی ازلحاظ کمینه‌سازی زمان کل، هزینه و تسطیح منابع ارائه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی پروژه، برنامه‌ریزی چندهدفه، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، تسطیح منابع، الگوریتم فراابتکاری

---

*نویسنده مسؤول

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی پروژه، تعیین یک توالی زمانی در قالب برنامه‌ریزی زمان‌بندی است جهت انجام فعالیت‌های وابسته به یکدیگر که تشکیل‌دهندهٔ شبکه‌ای به‌نام پروژه هستند. وابستگی فعالیت‌ها درحقیقت ترتیبی است که تقدم و تأخرشان به‌دلیل محدودیت‌های فنی در اجرای پروژه باید رعایت شود. محدودیت‌های پیش‌نیازی، جزء جدانشدنی پروژه هستند؛ ولی برای تطابق هرچه بیشتر با دنیای واقعی پروژه‌ها لازم است محدودیت‌های منابع، که در تهیهٔ برنامه‌ریزی زمان‌بندی توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است، لحاظ شود و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام گیرد. بنابراین، مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه هم از دیدگاه عملی و هم از دیدگاه نظری مهم است.

مجریان پروژه علاوه‌بر محدودیت‌های مالی و زمانی، با محدودیت منابع فیزیکی نیز درگیر هستند؛ منظور از منابع فیزیکی عمدتاً منابع انسانی و ماشین‌آلات است. نیازهای منبع یک شرکت مجری پروژه‌های ساخت با زمان تغییر می‌کند؛ بدین‌معنی که در یک بازهٔ زمانی ممکن است نیاز زیادی به منبع باشد و در بازهٔ زمانی بعدی این نیاز کاهش یابد. لذا، معمولاً شرکت‌ها از هرکدام از منابع، تعداد محدود و مشخصی برای خود تهیه می‌کنند و اجرای پروژه‌ها را براین‌اساس برنامه‌ریزی می‌کنند. از عوامل دیگری که نیازمند توجه برنامه‌ریزان پروژه‌ها و به‌طور خاص پروژه‌های ساخت هستند، مسئلهٔ نوسانات در مصرف منابع است. در سال‌های اخیر راجع‌به مسئلهٔ تسطیح منابع با هدف کم‌کردن مقدار نوسان در مصرف دوره‌ای منابع، می‌توان به شرکت‌های چندپروژه‌ای اشاره کرد. هرچه نوسانات دوره‌ای تقاضای منابع برای هریک از پروژه‌ها بیشتر باشد، نیاز به نقل‌وانتقال بیشتر آن به وجود می‌آید که خود دربرگیرندهٔ هزینه است.

هدف زمان‌بندی این است که پروژه علاوه‌بر ارضای قیود مربوط به محدودیت منابع، در کمترین زمان و حداقل هزینه به پایان برسد و نوسانات منابع در بازهٔ زمانی اجرای پروژه حداقل باشد. به‌منظور بهینه‌سازی زمان-هزینه و منابع اجرایی در پروژه‌های عمرانی، روش‌های متفاوتی اعم از ریاضی و فراابتکاری در دو حوزهٔ آنالیز موازنه زمان-هزینه و تسطیح-تخصیص منابع به کار گرفته می‌شوند. روش‌های فراابتکاری عموماً به مسئلهٔ وابسته است و دست‌یابی به جواب بهینه را تضمین نمی‌کند. همچنین، روش‌های ریاضی با افزایش ابعاد و پیچیدگی مسئله، کارایی خود را از دست می‌دهند؛ هرچند این روش‌ها دست‌یافتن به جواب بهینه را تضمین می‌کنند. با توجه به موارد گفته‌شده و اهمیت هم‌زمان آنالیز موازنهٔ زمان-هزینه و تخصیص و تسطیح منابع، لزوم به‌کارگیری یک الگوریتم کاراتر کاملاً احساس می‌شود. در این زمینه، تکنیک شبیه‌سازی (به‌دلیل انطباق با دنیای واقعی و خاصیت احتمالی و تصادفی‌بودن آن) و الگوریتم ژنتیک (به‌دلیل شدنی‌بودن آن در فضای مسائل چندهدفه و چندمعیاره) درخورِ توجه قرار گرفته‌اند. در این مطالعه نیز موضوع، یافتن یک رهیافت برای زمان‌بندی پروژه است؛ منظور از زمان‌بندی، تعیین زمان شروع برای اجرای تک‌تک فعالیت‌ها و حالت‌های مختلف اجرای آن‌ها است. به این منظور، بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی و الگوریتم فراابتکاری انجام می‌شوند و این دو راه حل مقایسه می‌شوند.

ساختار مقاله بدین شکل است که در ابتدا به ادبیات

موضوع و در بخش بعد به بررسی شبیه‌سازی در مدیریت پروژه پرداخته می‌شود. در ادامه، به بررسی مسئله و مفروضات آن اشاره می‌شود و مدل مسئله مطرح می‌شود. همچنین، با یک مثال عددی به مقایسهٔ حل دو روش شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک پرداخته شده و راهکارهایی ارائه می‌شود. درنهایت پس از نتیجه‌گیری، پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده مطرح می‌شود.

۲- پیشینهٔ تحقیق

حداقل‌کردن طول مدت‌زمان اجرای پروژه متداول‌ترین و معمول‌ترین معیار است که محققان زمان‌بندی پروژه به کار گرفته می‌گیرند. در همین راستا، معیارهای دیگری را محققان مختلف پیشنهاد کرده‌اند، نظیر:

- ✓ حداقل‌کردن تأخیر وزنی[۱] (بالستین و همکاران[۲]، ۲۰۰۶، کولیش[۳]، ۲۰۰۰، نودتاسومبون و راندهاوا[۴]، ۱۹۹۷، وینا و دسوزا[۵]، ۲۰۰۰)؛
- ✓ حداقل‌کردن حداکثر انحراف و تأخیر وزنی کل[۶] (نودتاسومبون و راندهاوا ، ۱۹۹۷)؛
- ✓ حداقل‌کردن جمع وزنی تمام مقادیر زودکرد و تأخیر[۷] (وان هوک و همکاران[۸]، ۲۰۰۱)؛
- ✓ حداقل‌کردن جمع مقادیر تأخیر و زودکرد[۹] (دیویس و همکاران[۱۰]، ۱۹۹۲، نیومن و زیمرمن[۱۱]، ۲۰۰۲ و ویانا و دسوزا، ۲۰۰۰)؛
- ✓ حداقل‌کردن واحدهای به‌کارگرفته‌شده از هر منبع، که از یک حد داده‌شده تجاوز کرده است[۱۲].

بومسدرف و دریگس[۱۳](۲۰۰۸) در تحقیق خود، تعداد و طول فضاهای خاص[۱۴] در نمودار منبع را حداقل کردند. آکان و همکاران[۱۵](۲۰۰۵) و دیمولمیستر و همکاران[۱۶] (۱۹۹۸) توابع هدف مبتنی بر منابع تجدیدناپذیر را در نظر گرفته‌اند. به این صورت که در مسئلهٔ موازنهٔ زمان–هزینه، تنها مصرف منابع تجدیدناپذیر به‌عنوان هزینه در نظر گرفته شده است. به‌طور مشابه، نودتاسومبون و راندهاوا (۱۹۹۷) و طارقیان و طاهری[۱۷](۲۰۰۷) مصرف منبع تجدیدناپذیر را که به‌عنوان هزینه نشان دادند، حداقل کردند. نودتاسومبون و راندهاوا (۱۹۹۷) و ویانا و دسوزا (۲۰۰۰) نیز حداقل‌کردن مصرف بیش از ظرفیت منابع تجدیدناپذیر را پیشنهاد کردند. در تحقیقی دیگر، نونوب و ایباراکی[۱۸](۲۰۰۶) هزینه در ارتباط با زمان انتخاب‌شده برای اجرای فعالیت‌ها را حداقل کردند. رومل و همکاران[۱۹](۲۰۰۵) نیز یک تابع هدف هزینه با دو جزء ارائه کردند که شامل هزینهٔ متناسب با زمان اتمام پروژه و هزینهٔ ادغام فعالیت‌ها است. تابع هدف ذکرشده در مسئله‌ای بدون محدودیت منابع استفاده شده است.

یکی از روش‌های رایج به‌منظور استفاده از اهداف چندگانه[۲۰] این است که یک تابع هدف کلی تعریف می‌شود و به صورت معیارهای ارزیابی عملکرد وزنی در آن، با یکدیگر جمع می‌شوند. وب و ویت[۲۱](۲۰۰۷) نیز برای همین مسئله تابع هدفی شامل زمان اتمام پروژه، تأخیر وزنی و هزینهٔ راه‌اندازی[۲۲] در نظر گرفتند. یک روش دیگر به‌منظور برخورد با مسئلهٔ چندهدفه، تولید برنامه‌های زمان‌بندی بهینه پارتو[۲۳] است. این روش را محققان زیادی به کارگرفته‌اند. ویانا و دسوزا (۲۰۰۰) به این موضوع، مصرف بیش‌ازحد هر منبع تجدیدناپذیر و میانگین تأخیر وزنی[۲۴] را اضافه کردند. همچنین، دوندورف و همکاران[۲۵](۲۰۰۰) سه هدف را در مسئلهٔ موازنهٔ زمان–هزینه به کار بردند.

درواقع، مسئلهٔ موازنهٔ زمان–هزینه از سال ۱۹۶۰

میلادی، توجه بسیاری از محققان را به سوی خود جلب کرده است. دلیل این امر، وجود مسائل ترکیبی و مدل‌های پیچیده است که بسیاری از آن‌ها براساس تحقیق پرابادا و همکاران[۲۶] (۱۹۹۷)، NP-hard هستند و به‌سختی حل می‌شوند. ژنگ و همکاران[۲۷](۲۰۰٤) نیز با استفاده از نتایج حاصل از گذشته، برای اولین بار نتایج حاصل از مسئلهٔ موازنهٔ زمان-هزینه را به دو صورت AWA[۲۸] و MAWA[۲۹] با یکدیگر مقایسه کردند. هر دو روش استفاده‌شده، تک‌هدفه بوده ولی سرعت همگرائی به سمت جواب بهینه در روش AWA بیشتر شده است. در ادامه، اشتاردین و همکاران[۳۰] (۲۰۰۸) موضوع عدم‌قطعیت را در مدل زمان-هزینه در نظر گرفتند و از منطق فازی استفاده کردند. ولیانگ و چنگن[۳۱](۲۰۰۹) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به موازنهٔ زمان-هزینهٔ ناپیوستهٔ پروژه، تحت شرایط قیود منبع پرداختند. آن‌ها تنها منابع تجدیدشدنی را در نظر گرفتند و هزینهٔ مستقیم و غیرمستقیم را به صورت تابعی از میزان مصرف منبع تجدیدشدنی وارد مدل کردند. قدوسی و کاظمی(۱۳۸٤) نیز با استفاده از برنامه Excel به بهینه‌سازی رابطهٔ هزینه-زمان در پروژه‌های بزرگ عمرانی پرداختند.

۳- استفاده از شبیه‌سازی در مدیریت زمان‌بندی پروژه

۳-۱- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی یکی از راه‌های تجزیه و تحلیل سیستم‌ها است که تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است. این روش می‌تواند از بهترین راهکارها در تصمیم‌گیری مدیران ارشد سازمان‌ها جهت اصلاح فرآیند انجام کار باشد. استفاده از شبیه‌سازی در مسئلهٔ زمان‌بندی فعالیت‌ها در چند حالت بدین صورت است که در اجراهای زیاد، حالت‌های مختلف را در مسئله به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند و زمان هر یک از فعالیت‌ها را به صورت احتمالی در نظر می‌گیرد. این موضوع، به شرایط واقعی پروژه نزدیک‌تر است و زمان، منابع و هزینه را به جای شرایط قطعی در شرایط احتمالی فرض می‌کند. همین امر، کارایی حل مسئله را افزایش می دهد و جواب‌های حاصل به شرایط واقعی نزدیکتر می‌شوند. همچنین، جواب‌های حاصل و روند انجام آن در هر زمان از اجرای پروژه و میزان استفاده از زمان هر فعالیت در هر لحظه قابلِ‌مشاهده است؛ به همین دلیل، می‌توان در هر لحظه اِشکالات و معضلات انجام پروژه را کاملاً برطرف کرد.

۳-۲- گام‌های شبیه‌سازی

۱. فرموله‌کردن مسئله: هر مطالعهٔ شبیه‌سازی با بیان یک مسئله آغاز می‌شود؛

۲. هدف‌گذاری و طراحی جامع پروژه: در این گام، هدف اصلی انجام شبیه‌سازی به‌صورت دقیق‌تر تعیین می‌شود؛

۳. طراحی مفهومی مدل: سیستم واقعی مطالعه‌شده در یک مدل مفهومی خلاصه می‌شود که مجموعه‌ای از روابط ریاضی و منطق مربوط به اجزا و ساختار سیستم است؛

٤. جمع‌آوری داده‌ها: این قدم هم‌زمان با مدل قابلِ‌پیگیری است و به جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های موردِنیاز اختصاص دارد؛

۵. برگردان مدل: در این قدم، مدل مفهومی ساخته‌شده در قدم ۳، در یک محیط کامپیوتری

برنامه‌نویسی می‌شود و به شکل یک مدل عملیاتی تبدیل می‌شود؛

٦. رفع خطاهای برنامه‌ریزی: در این قدم، برنامه کامپیوتری استفاده‌شده از لحاظ تطابق با مدل مفهومی مدنظر ارزیابی می‌شود؛

۷. اعتبارسنجی: در این مرحله، میزان تطابق و مدل مفهومی با شرایط واقعی سیستم بررسی‌شده آزمون می‌شود؛

۸. طراحی آزمایش‌ها: در این قدم، تصمیم‌گیری می‌شود که طول هر اجرای شبیه‌سازی، تعداد تکرارهای هر اجرا و نحوهٔ آغاز به کار سیستم شبیه‌سازی به چه صورت است؛

۹. اجرا و تحلیل: شبیه‌سازی اجرا می‌شود و معیارهای عملکرد طرح‌های شبیه‌سازی به دست می‌آیند؛

۱۰. اجراهای بیشتر: براساس تحلیل اجراهای انجام‌شده، تحلیل‌گر شبیه‌سازی دربارهٔ انجام اجراهای بیشتر تصمیم می‌گیرد؛

۱۱. گزارش‌نویسی: در این قدم، گزارش مطابق با تعهدات صورت‌گرفته و وضعیت مخاطبان گزارش‌ها تهیه می‌شود؛

۱۲. پیاده‌سازی: شبیه‌سازی تصمیم نهایی درمورد طرح قابل‌قبول برای سیستم در حال بررسی را کارفرما انجام می‌دهد. شبیه‌سازی با گزارش (گام‌به‌گام)، صرفاً ابزارهای ارزیابی عملکرد طرح‌های مختلف را فراهم می‌کند.

۳-۳- شبیه‌سازی در مسئلهٔ مورد مطالعاتی

نرم‌افزار استفاده‌شده در این پایان‌نامه ED[۳۲] است. نرم‌افزار ED یکی از ابزارهای قدرتمند شبیه‌سازی در صنعت است که می‌توان به استفاده از آن در صنایع هوایی، زنجیرهٔ تأمین و غیره اشاره کرد. درنتیجه در این تحقیق، مدل شبکه زمان‌بندی پروژه که در شکل (۱) آمده است، در نرم‌افزار وارد شد و با استفاده از زمان‌های غیر قطعی در پروژه به اجرای آن پراخته شد. نرم افزار گفته‌شده، با استفاده از برنامه‌نویسی و کدنویسی انجام‌شده در آن، خروجی‌هایی ارائه می‌کند که می‌توان با استفاده از نرم‌افزار Matlab و Excel مقادیر توابع هدف موردنظر را محاسبه کرد و بهترین‌های آن‌ها را برگزید. همچنین در ادامه، نتایج حاصل با جواب‌های حاصل از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک مقایسه شد و راهی مناسب برای بهترین زمان‌بندی، انتخاب شد.

۳-٤- موارد مورد استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی در مطالعهٔ موردی

Product: نهادی است که وارد سیستم می‌شود. در این تحقیق، به‌منظور شروع شبیه‌سازی و طی‌کردن مراحل مربوطه، به این نهاد نیاز است.

Source: اتمی است که براساس تابع مشخص‌شده‌ای، اتم‌های Product را تولید می‌کند. در این پژوهش از این اتم به‌منظور تولید یک Product برای شروع تولید نهادی که باید وارد سیستم شود، استفاده می‌شود.

Queue: هر جا که نیاز به تشکیل صف باشد از این اتم استفاده می‌شود. در شبکهٔ پروژهٔ این تحقیق و در هر قسمت که فعالیت‌ها به تأخیر نیاز داشته باشد و یا اینکه چند فعالیت پیش‌نیاز یک فعالیت باشند از این اتم استفاده می‌شود.

Server: اتمی که بر روی Product خدمت ارائه می‌دهد. در این تحقیق، به جای هرکدام از فعالیت‌های پروژه از این اتم استفاده شده است.

Sink: برای خارج‌کردن Productهای حاصل از

شبیه‌سازی به کار می‌روند. در این تحقیق، از این اتم به‌منظور پایان شبیه‌سازی در یک بار اجرا و شروع بار دیگر شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

٤- مدل و طرح مسئله

٤-١- مفروضات مسئله

یک پروژه که شامل J فعالیت است را در نظر می‌گیریم. شبکه فعالیت‌ها به‌صورت «فعالیت در گره[۳۳]» را گراف G=(N,A) نمایش می‌دهد. N مجموعه فعالیت‌ها روی شبکه است که به‌صورت j=0,ھ,J +1 نام‌گذاری شده‌اند. توجه شود فعالیت‌های ۰ و J+1 ، فعالیت‌های مجازی شروع و پایان هستند. در اینجا، A یال‌های گراف، نشان‌دهندهٔ روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها هستند. این روابط از نوع «پایان به شروع[۳٤]» با زمان تأخیر[۳۵] صفر هستند. پیش‌نیازهای فعالیت j را مجموعهٔ پیش‌نیازی‌های مستقیم P_j داده و بیان‌کنندهٔ این موضوع است که فعالیت j شروع نمی‌شود، مگر اینکه تمامی فعالیت‌های درون مجموعه P_j به پایان رسیده باشند. به‌جز فعالیت‌های مجازی شروع و پایان، هر فعالیت به‌مقدار مشخصی از منابع، برای فرایند اجرای خود نیاز دارد. در این تحقیق، مجموعهٔ منابع تجدیدشدنی با K^ρ نمایش داده می‌شود. برای هر منبع تجدیدشدنی $k \in K^\rho$ موجودیت و یا ظرفیت آن در واحد زمان، با R_k^ρ و مجموعه منابع تجدیدنشدنی با K^ν نمایش داده می‌شود. شایان ذکر است، برای هر منبع تجدیدنشدنی $k \in K^\nu$، موجودیت آن برای کل پروژه برابر R_k^ν است.

همچنین، هر فعالیت می‌تواند در یک حالت از چندین حالت مختلف، اجراو تکمیل شود. یک حالت، نشان‌دهندهٔ ترکیبات مختلفی از منابع و یا درجهٔ نیاز به منابع با زمان و هزینهٔ مرتبط به خود است. وقتی انجام فعالیت در یک حالت شروع شود، تا پایان فعالیت هیچ‌گونه وقفه و یا تعویض آن حالت مجاز نیست. فعالیت j امکان دارد در یکی از m_j حالت اجرا شود و این مجموعه شامل M_j عضو می باشد که اعضای این مجموعه برابر با $m_j = \{1,...,M_j\}$ می باشد.

همچنین، زمان اجرای فعالیت j در حالت $m \in M_j$ به‌صورت d_{jm} نمایش داده می‌شود. به‌علاوه اجرای فعالیت j در حالت m، به‌میزان r_{jmk}^ρ از منبع تجدیدشدنی k در هر بازهٔ زمانی استفاده می‌کند و بدون نقض عمومیت مسئله، فرض می‌شود به ازای هر منبع تجدیدشدنی $r_{jmk}^\rho \le R_k^\rho, k \in K^\rho$ است. توجه شود در غیر این صورت فعالیت j نمی‌تواند در حالت m اجرا شود. همچنین، اجرای فعالیت j در حالت اجرای m، هزینهٔ مستقیم c_{jm} را برای پروژه در بر دارد. فرض می‌شود که فعالیت‌های مجازی شروع و پایان، تنها یک حالت اجرا با مدت زمان صفر دارند و هیچ‌گونه منبعی اعم از منابع تجدیدشدنی و یا نشدنی (بودجه) را مصرف نمی‌کنند.

٤-٢- توابع و مدل ریاضی مسئله

همان‌طور که از قبل بیان شد، محاسبات هزینه و زمان برای مدل بر مبنای MRCPSP[۳٦] پایه‌گذاری شده است. ازآنجاکه هدف این تحقیق، حل زیر مسئلهٔ سوم، یعنی آنالیز کامل زمان-هزینه و یافتن بهترین زمان‌ها و هزینه‌های مربوطه است، مسئله فرجه و بودجه، توأمان مدنظر قرار می‌گیرند. با توجه به این توضیحات، مدل ریاضی مسئله به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_c = \sum_j \sum_{m \in M_j} (x_{jm} c_{jm}) + f_J c_j + y_J c_p (f_J - T_{contract}) \quad (۱)$$

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{اگر فعالیت } j \text{ ام در حالت } m \text{ ام اجرا شود} \\ 0, & \text{در غیر صورت} \end{cases} \quad (۲)$$

$$= \begin{cases} 1, & \text{اگر فعالیت } j \text{ ام در حالت } m \text{ ام اتفاق بیفتد} \\ 0, & \text{در غیر صورت} \end{cases} \quad (۳)$$

$$y_j = \begin{cases} 1, f_J > T_{contract} \\ 0, f_J \le T_{contract} \end{cases}$$

روابط فوق، تابع هزینه در مدل تعریف‌شده است که از سه قسمت تشکیل می‌شود: هزینهٔ مستقیم هر فعالیت که با c_{jm} نشان داده شده است، هزینهٔ غیرمستقیم برای کل پروژه و جریمه در صورت تأخیر نسبت به تاریخ تعیین شده در مناقصه($T_{contract}$). در رابطهٔ (۲) و (۳)، x_j و y_j متغیرهای صفر و یک هستند. f_J زمان پایان آخرین فعالیت پروژه (J) است. c_j و c_p به ترتیب، هزینهٔ غیرمستقیم در هر روز اجرای پروژه و جریمهٔ تأخیر به‌ازای هر روز دیرکرد هستند.

$$F_t = f_t \quad (٤)$$

در این رابطه تابع زمان تعریف شده است. زمان اجرای پروژه یعنی F_t معادل زمان پایان آخرین فعالیت f_t است.

$$\min F_t \quad (٥)$$

$$\min F_c \quad (٦)$$

$$\sum_{m \in M_j} x_{jm} = 1 \qquad j \in V \quad (٧)$$

$$f_j - \sum_{m \in M_j} x_{jm} . d_{jm} \ge f_i \qquad \forall (i,j) \in E \quad (٨)$$

$$\sum_{j \in A} \sum_{m \in M_j} (x_{jm} . r_{jmk}) \le R_k \quad k = 1,...,k \quad (٩)$$

$$A_t = \{ j \mid f_j - d_j < t \le f_j \}$$

روابط (۵) و (٦) دو تابع هدف مدل هستند که به‌ترتیب زمان و هزینه را کمینه می‌کنند. قید شماره (۷)، اجرای فعالیت‌ها را تنها در یک حالت اجرا در فعالیت j مستلزم می‌کند. قید شماره (۸) ارائه‌دهندهٔ روابط اولویت‌بندی بین فعالیت‌هاست که در آن d_{jm} زمان اجرای فعالیت J در حالت اجرای m و همچنین x_{jm} بیانگر انجام فعالیت j ام در حالت m ام است. قید شماره (۹) این موضوع را بیان می‌کند که مجموع میزان مصرف منبع تجدیدشدنی k، توسط فعالیت‌هایی که در واحد زمانی t در حال اجرا هستند (مجموعه A_t)، از ظرفیت موجود برای آن منبع R_k نمی‌تواند تخطی کند که در آن r_{jmk} بیانگر استفاده از منبع تجدید شدنی k ام در حالت m ام توسط فعالیت j ام می باشد.

مدل پیشنهادشده در این تحقیق، از لنگر[۳۷] هیستوگرام منابع حول محور x برای تسطیح منابع استفاده می‌کند. این در حالتی است که تأکید پیمانکار بر کاهش نوسانات استفاده از منابع باشد و تابع هدف طبق رابطهٔ (۱۰) است:

$$\text{Min} M_x = \sum_{k=1}^{K} \sum_{d=1}^{T} (r_{dk} - \bar{r})^2 \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، r_{dk} تعداد منبع مصرفی K در بازهٔ زمانی dام است. R میانگین مصرف منبع مصرفی k در بازهٔ زمانی T است. T زمان استفاده از منبع k و k تعداد کل منابع تجدیدشدنی است.

در این تحقیق، تلاش بر این است که در ابتدا مسئلهٔ مدنظر با استفاده از شبیه‌سازی حل شود؛ سه گروه از

جواب‌ها یعنی زمان، هزینه و گشتاور منابع به‌ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای ED، Matlab و Excel به دست آورده شود؛ مجموعه جواب‌هایی با استفاده از الگوریتم NSGA-II، که شامل روش‌های اصلاح‌شده برای آمیزش، جهش و انتخاب نسل بعد هستند، محاسبه شود؛ نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل در یک مسئلهٔ نمونه، ارائه و تفسیر شده و درنهایت، این دو مجموعه جواب با یکدیگر مقایسه شوند.

۵- مطالعهٔ موردی

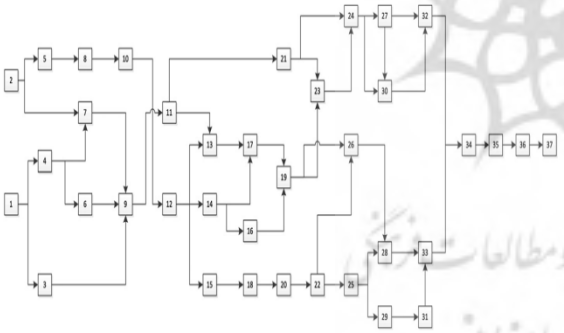
۵-۱- تشریح مطالعهٔ موردی

در این بخش، یک پروژهٔ واقعی ساخت انبار کالا، برگرفته‌شده از چن و ونگ[۳۸](۲۰۰۹) و با اندکی تغییر به‌منظور تطبیق دادن با مدل، به‌منظور ارزیابی کارایی مدل در محیط‌های صنعتی و پروژه‌های عمرانی در مقیاس واقعی‌تر بررسی شد. این شبکه دارای ۳۷ فعالیت است. داده‌های مسئله در جدول (۱) نمایش داده شده است. شرکت پیمانکار در این پروژه توانایی به‌کارگیری حداکثر ۱۲ پرسنل یا نیروی متخصص در روز را دارد. در این مثال، محقق هزینهٔ مستقیم را به مصرف منابع ارتباط داده و هزینهٔ هر پرسنل را در روز معادل ۱۰۰ دلار قرار داده است. همچنین، هزینه‌های غیرمستقیم برای پروژه گفته‌شده ۶۰۰ دلار در روز است. هدف مسئله نیز یافتن بهترین گزینه‌های روش اجرا و زمان‌بندی‌های مربوطه، با درنظرگرفتن حداقل هزینه، زمان اجرا و نوسانات منبع است.

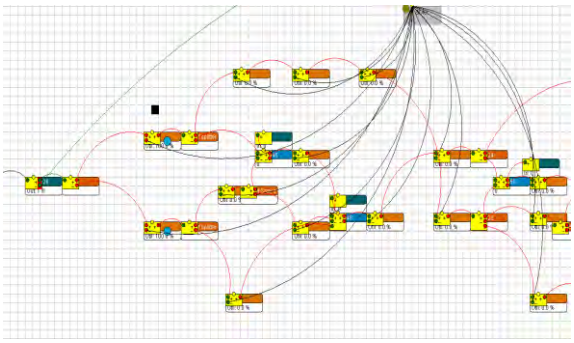
۵-۲- حل مدل با استفاده از شبیه‌سازی

مسئلهٔ مطالعهٔ موردی شبکه پروژه شکل(۱) به‌صورت شکل(۲) در نرم‌افزار ED مدل شده است. برای پایایی برنامه، نرم‌افزار شبیه‌سازی ED به تعداد ۵۰۰ بار اجرا شد و پس از چند ساعت اجرا، نتایجی را در خروجی اکسل ارائه داد. نتایج حاصل، زمان‌بندی پروژه را به‌صورت شبیه‌سازی‌شده با زمان‌های غیرقطعی نشان می‌دهد. یکی از مزایای شبیه‌سازی درنظرگرفتن زمان‌های پروژه به‌صورت غیرقطعی و تصادفی است که در اینجا زمان، هزینه و منابع به صورت تصادفی و غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. مدل شبیه‌سازی‌شده را سیستمی با مشخصات Intel® Core™ i5-2014 CPU@2.30 GHz اجرا کرده است. فرایند به‌گونه‌ای است که ابتدا شبکه پروژه را رسم می‌کند، در قسمت بعدی به نرم‌افزار انتقال می‌دهیم و با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار ED مسئلهٔ زمان‌بندی‌های مختلف را اجرا می‌کنیم.

شبکهٔ مدل‌شده در نرم‌افزار به‌صورت شکل (۲) است.



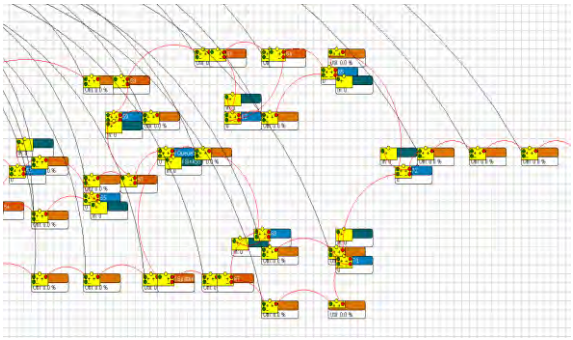
شکل ۱- شبکهٔ فعالیت‌های پروژهٔ مطالعهٔ موردی برگرفته از چن و ونگ (۲۰۰۸)



شکل ۲- مدل شبکهٔ پروژهٔ مطالعه‌شده در نرم‌افزار ED

جدول ۱- داده‌های مربوط به پروژهٔ واقعی

شمارهٔ فعالیت	نوع فعالیت	حالت اجرا	پیش‌نیازها	زمان اجرا (روز)	منابع انسانی مورد نیاز (نفر)	هزینهٔ مستقیم ($)
۱	تجهیز کارگاه	۱	-	۲۵	۲	۵۰۰۰
۲	آزمایش خاک	۱	-	۱۱	۲	۲۲۰۰
۳	خاک‌برداری	۱	۱	۲۱	٤	۸٤۰۰
		۲		۱٦	٦	۹٦۰۰
٤	شمع‌کوبی	۱	۱	۲۰	۵	۱۰۰۰۰
		۲		۱۸	٦	۱۰۸۰۰
۵	آزمایش بارگذاری شمع‌ها	۱	۲	۱۵	۲	۳۰۰۰
٦	اجرای خاک‌ریز	۱	٤	۹	۳	۲۷۰۰
		۲		٦	۵	۳۰۰۰
۷	اجرای سرشمع‌ها	۱	۲و٤	۱٤	٤	۵٦۰۰
		۲		۱۰	٦	٦۰۰۰
۸	آرماتوربندی ستون‌ها	۱	۵	۱۰	۵	۵۰۰۰
۹	بتن‌ریزی فنداسیون	۱	۳و٦و۷	۱۲	۵	٦۰۰۰
		۲		۱۱	٦	٦۰۰۰
۱۰	قالب‌بندی ستون‌ها	۱	۸		٤	٤۰۰۰
۱۱	قالب‌بندی تیرها و دال بام	۱	۹	۱۲	۵	٦۰۰۰
۱۲	بتن‌ریزی ستون ها	۱	۱۰	۱۰	٤	٤۰۰۰
۱۳	آرماتوربندی تیرها و دام بال	۱	۱۱و۱۲	۱۰	۵	۵۰۰۰
۱٤	اجرای دیوار جان‌پناه بام	۱	۱۲	۱٤	۵	۷۰۰۰
۱۵	ارزیابی و سنجش عملکرد ۱	۱	۱۲	۷	٤	۲۸۰۰
۱٦	نصب چهارچوب در و پنجره	۱	۱٤	۷	۳	۲۱۰۰
۱۷	ارزیابی و سنجش عملکرد ۲	۱	۱۳و۱٤	۷	٤	۲۱۰۰
۱۸	بتن‌ریزی دال بام	۱	۱۵	۱۲	٤	٤۸۰۰
		۲		۹	٦	۵٤۰۰
۱۹	اندودکاری دیوارهای داخلی	۱	۱٦و۱۷	۱۰	٤	٤۰۰۰
۲۰	اجرای تیغه‌های آجری	۱	۱۸	۱٤	٤	۵٦۰۰
		۲		۱۰	٦	٦۰۰۰
۲۱	اجرای سقف کاذب	۱	۱۱	۷	٤	۲۸۰۰
۲۲	ساخت سرویس‌های بهداشتی	۱	۲۰	۱٤	۳	٤۲۰۰
		۲		۱۰	۵	۵۰۰۰
۲۳	آب‌بندی و زهکشی	۱	۱۹و۲۱	۱	٤	٤۰۰۰
۲٤	اجرای کف‌بند	۱	۲۱و۲۳	۹	۵	٤۵۰۰
۲۵	نصب در و پنجره	۱	۲۲	۷	۵	۳۵۰۰
۲٦	رنگ‌آمیزی داخل	۱	۲۲	۷	۵	۳۵۰۰
۲۷	نصب نرده ها	۱	۲٤	۱٦	۵	۸۰۰۰
۲۸	اندودکردن دیوارهای خارجی	۱	۲۵	۱۰	٤	٤۰۰۰
		۲		۹	۵	٤۵۰۰
۲۹	برق‌کشی	۱	۲۵	٦	۲	۱۲۰۰
۳۰	نصب در اصلی	۱	۲٤و۲۷	۳	۳	۹۰۰
۳۱	رنگ‌آمیزی دیوارخارجی	۱	۲٦و۲۹	۱۲	٤	٤۸۰۰
۳۲	بازدید توسط کارشناس	۱	۲۷و۳۰	۵	۲	۱۰۰۰
۳۳	محوطه‌سازی بیرون	۱	۲۸و۳۱	۱۰	۲	۲۰۰۰
۳٤	بازرسی مأمور بازدید	۱	۳۲و۳۳	۷	۱	۷۰۰
۳۵	اخذ مجوز از مأمور بازدید	۱	۳٤	۷	۱	۷۰۰
۳٦	برطرف‌کردن نواقص	۱	۳۵	۱٤	۱	۱٤۰۰
۳۷	تحویل‌دادن پروژه	۱	۳٦	۱	۱	۱۰۰



ادامه شکل ۲- مدل شبکهٔ پروژهٔ مطالعه‌شده در نرم‌افزار ED

به‌علت گستردگی مدل، قرارگرفتن آن‌ها در یک صفحه امکان‌پذیر نبوده و در دو بخش به تصویر کشیده شده است. کدنویسی این برنامه در ED به گونه‌ای است که پس از پایان هر بار اجرا و در حین اجرا اطلاعاتی دربارهٔ زمان انجام آن‌ها و حالت اجرای فعالیت‌ها در نرم‌افزار Excel ارائه می‌دهد، که سطرها بیانگر هر بار اجرا و ستون‌ها بیانگر فعالیت‌ها هستند. در هر ستون، زمان هر فعالیت به‌صورت تصادفی است و از توزیع نرمال با میانگین زمان انجام فعالیت و انحراف معیار ۲۰٪ پیروی می‌کند. در ادامه، نرم‌افزار Matlab با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و با استفاده از زمان‌بندی به‌دست‌آمده و زمان کل، محاسبات گشتاور منابع را انجام می‌دهد. نرم‌افزار Excel نیز محاسبات مربوط به هزینه را با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی زمان‌بندی و منابع انسانی در نرم‌افزار Matlab به دست می‌دهد. در نهایت، با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری، داده‌های به‌دست‌آمده به‌گونه‌ای مرتب می‌شوند که با درنظرگرفتن هر سه تابع هدف، برخی از بهترین‌ها با توجه به اهمیت وزن تابع هدف آن به‌صورت جدول (۲) اولویت‌بندی شوند.

جدول ۲- بخشی از نتایج حاصل زمان‌بندی از طریق شبیه‌سازی

شمارهٔ اجرای برنامه	زمان اجرای کل (روز)	هزینه (دلار)	واریانس لنگر منابع
۱	۲۰۹	۲۷۱۰۵۰	۱۹۸۲/۷۵
۲	۲۰۹	۲۶۹۲۱۶	۲۱۵۲/۳
۳	۱۹۸	۲۶۷۶۴۸	۲۱۲۶/۸۴
٤	۲۰۷	۲۷۱۹۰۲	۲۱۵۳/۲۵
٥	۲۰۰	۲۷۰۵۶۲	۲۳۱۷/۵۵
٦	۲۱۰	۲۷۳۱۷۹	۲۱۲۵/۱۲
۷	۱۹٦	۲۷۳۰٦۵	۲۲۸۰/۷
۸	۲۰۹	۲۷۱۱۵۲	۲۱٤۲/۷
۹	۱۹۷	۲٦٥٤۳۰	۲۱۰۱/۳۷
۱۰	۲۰۰	۲٦٦۸۳۷	۲۱٤٤/٦٤
۱۱	۲۱۰	۲٦۸۹۲۱	۲۰۸٤/۰٦
۱۲	۲۰٥	۲۷۸۳٥۰	۲۲۷۰/٦۹
۱۳	۱۹٦	۲٦۹۸٤۸	۲۳٤۰/۷٥
۱٤	۱۹٦	۲٦٦۰۹۳	۱۸۹۷/٥٥
۱٥	۱۹۹	۲٦٥۹۷۱	۲۰۸۱/۱۲
۱٦	۲۰۹	۲۷۱۹۷۱	۲۰٥۳/۱٦
۱۷	۲۱۰	۲۷۱٦٦٥	۲۰۰٦/۱
۱۸	۱۹٦	۲۷۸۰۳٥	۲۱۹۱/۳۳
۱۹	۱۹٦	۲٦۸۱٦٤	۲۲٥۷/٦٥
۲۰	۲۰٥	۲۷۹٦٦۳	۲۱٤۹/۳۳
۲۱	۲۰۳	۲٦٤۰۱۳	۲۱۷۹/٥
۲۲	۱۹۹	۲٦۲۸۸۳	۱۹٤۷/۸٤
۲۳	۲۰٦	۲۷۱٥٥٥	۲۲۱٤/٥٥
۲٤	۲۰٦	۲۷۱۳۳۸	۲۱٥٦/٦٥
۲٥	۱۹۹	۲٦۸۱٥٦	۲۲۰۰/۱۲
۲٦	۲۰۹	۲٦٥٥٥۲	۲۰۷۳/۷٥
۲۷	۲۰۲	۲۷۸٦٦۲	۱۹۰۸/۲٦
۲۸	۱۹۹	۲٦۳٤۹۹	۱۹٥۷/۲٥
۲۹	۲۱۰	۲۷٥۳۹۱	۱۹۷٥/٦٥
۳۰	۱۹۹	۲۷٥٥٤۷	۲۱۷۲/۳۳

۵-۳- حل مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک

همان‌طور که مشاهده شد، برای حل مسئله از مدل پیشنهادی در نرم‌افزار Matlab استفاده شد. در ادامه، پارامترهای متعلق به الگوریتم ژنتیک بعد از تحلیل حساسیت بر روی هر یک از آن‌ها به‌صورت زیر وارد مدل می‌شوند:

تعداد جمعیت اولیه = ۱۰۰، تعداد نسل ها=۵۰ و احتمال جهش = ۰/۰۳ و احتمال آمیزش = ۰/۹۷

بعد از گذشت ۵۰ نسل، تمام اعضای جمعیت در جبهۀ پارتو (جبهۀ اول) قرار گرفتند. بازنمایی هر کروموزوم بیان‌کنندۀ ترتیب انتخاب فعالیت‌ها به‌منظور زمان‌بندی و حالت اجرای مربوط به هر یک از آن‌ها است. توجه شود همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ترتیب فعالیت‌ها در کروموزوم‌ها با رعایت قیود پیش‌نیازی است. در ادامه، برای مقایسۀ اعضای جبهۀ اول پارتو یا به‌عبارت‌دیگر، بهترین برنامه‌های زمان‌بندی (در راستای اهداف مدل) جدول زمان-هزینه-واریانس لنگر منابع، این نتایج در جدول (۳) آورده شده است.

گفتنی است که از هر کروموزوم تنها و تنها یک برنامۀ زمان‌بندی به دست می‌آید؛ ولی یک برنامه زمان‌بندی مشخص برای کروموزوم های مختلف متفاوت است. دلیل این نکته، فعالیت‌هایی هستند که به‌صورت موازی شروع می‌شوند. برای مثال، جابه‌جایی موازی در لیست فعالیتهایی که زمان شروع یکسانی دارند و پشت سر هم در لیست قرار گرفته‌اند، منجر به یک بازنمایی جدید از کروموزوم می‌شود؛ اما از هر دو کروموزوم یک برنامه زمان‌بندی حاصل می‌شود.

جدول ۳- زمان-هزینه-واریانس لنگر منابع پاسخ‌های جبهۀ اول پارتو

شمارۀ کروموزوم	زمان (روز)	هزینه (دلار)	واریانس لنگر منابع
۱	۱۹۶	۲۶۸۱۰۰	۲۸۱۸/۷۵
۲	۱۹۹	۲۶۶۷۰۰	۲۴۱۵/۸۳۹
۳	۲۵۵	۲۸۱۸۰۰	۱۸۰۴/۱۱۶
٤	۱۹۶	۲۶۸۱۰۰	۲۸۱۸/۷۵
۵	۲۲۵	۲۸۱۸۰۰	۱۸۰۴/۱۱۶
٦	۲۲۰	۲۷۹۷۰۰	۱۸۶۶/۹۵۹
۷	۲۰۸	۲۷۰۵۰۰	۱۹۳۴/۹۹۵
۸	۲۲۱	۲۷۹۸۰۰	۱۸۲۱/۵۴۸
۹	۱۹۶	۲۶۸۶۰۰	۲۶۵۰/۸۳۷
۱۰	۲۰۸	۲۷۰۵۰۰	۱۹۳۴/۹۹۵
۱۱	۲۰۷	۲۶۹۹۰۰	۱۹۶۷/۶۹۱
۱۲	۱۹۷	۲۶۶۸۰۰	۲۵۹۰/۸۸۳
۱۳	۱۹۷	۲۶۶۹۰۰	۲۵۲۸/۷۹۲
۱٤	۱۹۸	۲۶۶۸۰۰	۲۴۹۹/۳۷٤
۱۵	۲۰۶	۲۶۹۷۰۰	۲۰۵۱/۲۴۸
۱٦	۲۰۶	۲۶۹۸۰۰	۲۰۰٤/۰۵۸
۱۷	۲۰۱	۲۶۷۵۰۰	۲۲۸٦/۷۸٦
۱۸	۲۰۲	۲۶۷۹۰۰	۲۲٤۳/۰۹٤
۱۹	۲۰۳	۲۶۸۸۰۰	۲۱۵۹/۱۷۲
۲۰	۲۰٤	۲۶۸۵۰۰	۲۱۱۵/۶۶۲
۲۱	۱۹۸	۲۶۷۸۰۰	۲٤۳۱/۳۷۵
۲۲	۲۰۰	۲۶۷۱۰۰	۲۳۷۳/۷۹۵
۲۳	۲۰۷	۲۶۹۹۰۰	۱۹۶۷/۶۹۱
۲٤	۲۰۵	۲۶۹۱۰۰	۲۰۸۲/۷۰۲
۲۵	۲۰۵	۲۶۹۱۰۰	۲۰۸۲/۷۰۲
۲٦	۱۹۸	۲۶۷٤۰۰	۲٤۳۷/٤۹۵
۲۷	۱۹٦	۲۶۸٦۰۰	۲٦۵۰/۸۳۷
۲۸	۲۰۳	۲۶۷۹۰۰	۲۱٦٤/۱۱۸
۲۹	۱۹۷	۲۶٦۸۰۰	۲۵۹۰/۸۸۳
۳۰	۲۰٤	۲۶۹٤۰۰	۲۰۹۹/۳۵۳

٦- تحلیل نتایج و ارائهٔ پیشنهادی برای بهینه‌سازی زمان‌بندی

با توجه به دو گروه به دست آمده از نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که با استفاده از شاخص میانگین‌های جامعهٔ به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک (زمان، هزینه، گشتاور منابع) مشاهده می‌شود که {۲۲۵۰۷، ۲٦۹۰۳٦، ۲۰۲/۹۱} ازلحاظ هزینه و مدت‌زمان از نتایج موجود از شبیه‌سازی {۲۱۰٦٤۵، ۲۷۰۲۳۵، ۲۰۳/۵۱}بهتر است، اما گشتاور نوسانات منابع حول محور میانگین مصرف منابع در طول مدت‌زمان مصرف در شبیه‌سازی بهتر است. البته، میزان تفاوت بین زمان‌بندی به‌دست‌آمده از هر دو روش مقدار چشمگیری نیست؛ اما با توجه به اینکه برای مدیر و کارفرما مسئلهٔ تخصیص منابع از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این قسمت کاراتر عمل کرده ولی در طرف مقابل و در مجموع الگوریتم ژنتیک کارایی بهتری از نظر هزینه و زمان داشته است.

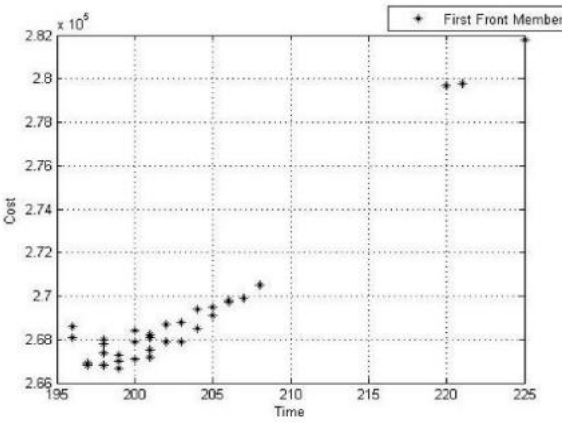
همچنین، با بررسی شکل (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش زمان در نمودار زمان–هزینه ابتدا هزینهٔ کاهش یافته است؛ سپس به‌دلیل وجود هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم، روند افزایشی هزینه‌ها در جواب‌ها مشاهده می‌شود. در نقطه‌ای که هزینه بهینه است، به‌دلیل تغییر شیب نمودار زمان–هزینه نرخ تغییرات هزینه نسبت به زمان اندک است. برای مثال، از جواب‌های با زمان ۱۹۵ روز تا ۲۰۵ روز، نهایتاً ۲۰۰۰ دلار تفاوت هزینه وجود دارد. اما با بررسی مسئلهٔ تسطیح منابع در شکل (٤) مشاهده می‌شود جواب‌هایی که به ۲۰۵ روز نزدیک‌ترند، واریانس مصرف منابع آن‌ها به‌شدت کمتر از جواب‌های با زمان کمتر از ۱۹۵ روز است. در نتیجه، با صرف همان هزینه ولی با زمان طولانی‌تر ۱۰ روز، می‌توان به‌مقدار درخور توجهی از نوسانات منابع جلوگیری کرد. این موضوع زمانی مهم است که منابع از نوع انسانی باشند. با بررسی نمودار نوسانات لنگر منابع–هزینهٔ ارائه‌شده در شکل (۵) نیز مشاهده می‌شود به‌طور کلی برنامه‌های زمان‌بندی که نوسانات کمتری در مصرف منابع دارند، هزینهٔ بیشتری را تا تکمیل پروژه طلب می‌کنند. در ادامه، برای اینکه نقش قید منابع در زمان‌بندی بررسی شود، آنالیز حساسیت روی منابع انجام می‌گیرد. این تحلیل حساسیت در شبیه‌سازی، سناریوسازی است که یک بار با ۱۲ نفر و بار دیگر با ۱۵ نفر این کار انجام می‌شود. به این ترتیب که ظرفیت در منبع تجدیدشدنی مسئله را ۲۵٪ افزایش داده و تعداد ۱۵ نفر در روز در نظر گرفته می‌شوند. حال، برای بررسی این که افزایش توان پیمانکار چه تأثیری در زمان، هزینه و تسطیح منابع دارد، نمودارهای زمان–هزینه، زمان–نوسانات منابع و نوسانات منابع–هزینهٔ مثال موردی با درنظرگرفتن ظرفیت منبع تجدیدشدنی ۱۵ نفر در روز، در شکل‌های (٦) تا (۸) آورده شده است.

با مقایسهٔ نمودارهای زمان–هزینه دو حالت مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت منبع به‌میزان ۲۵٪ زمان‌های بهینه به‌میزان درخور توجهی کاهش یافتند. برای نمونه، حداقل زمان تکمیل پروژه برای حالت اول ۱۹٦ روز بوده است که این مقدار با افزایش منبع، به ۱۷۸ روز کاهش پیدا کرد. همچنین هزینهٔ اجرا از ۲٦۸هزار و ۱۰۰ دلار در حالت اول به ۲۵٦هزار و ٤۰۰ دلار در حالت دوم رسید. در نمودارهای زمان–هزینه و زمان–نوسانات لنگر منابع، تعداد پاسخ‌هایی که یک زمان اتمام پروژه دارند، برابرند. رابطهٔ بین نقاط روی یک خط عمودی در دو

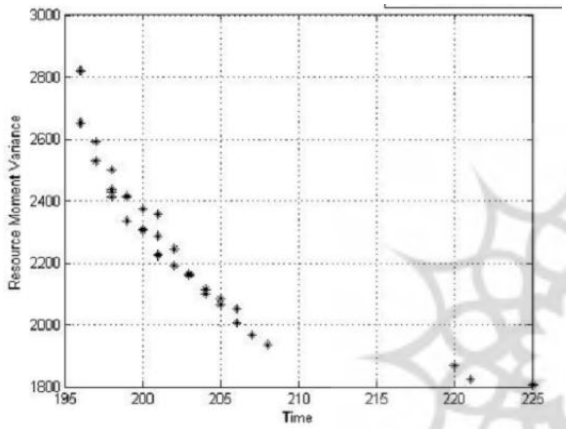
نمودار این‌گونه است که با یک زمان پایان، نقاطی که هزینهٔ بیشتری در نمودار زمان–هزینه دارند، نوسان منبع کمتری در نمودار زمان–نوسانات لنگر منابع به خود اختصاص داده‌اند.

دلیل کاهش هزینه با کاهش زمان بر خلاف حالت معمول پروژه‌های عمرانی این است که در این مثال نسبت هزینهٔ غیرمستقیم به هزینهٔ مستقیم در هر روز، درخور توجه است. برای مثال، نقطه با زمان ۱۷۸ روز و هزینهٔ ۲۵۵هزار دلار هزینه، پایین‌ترین نقطه روی نمودار زمان–هزینه شکل (٦) است. بالاترین نقطه هم دارای زمان ۱۹۸ روز و ۲٦۷هزار و ۲۰۰ دلار هزینه است. اختلاف زمان دو پاسخ برابر ۲۰ روز است و با توجه به داده‌های مسئله، ۱۲هزار دلار میزان هزینهٔ غیرمستقیم در این ۲۰ روز است؛ یعنی تقریباً معادل تفاوت هزینهٔ کل دو پاسخی که در اینجا بررسی شده است.

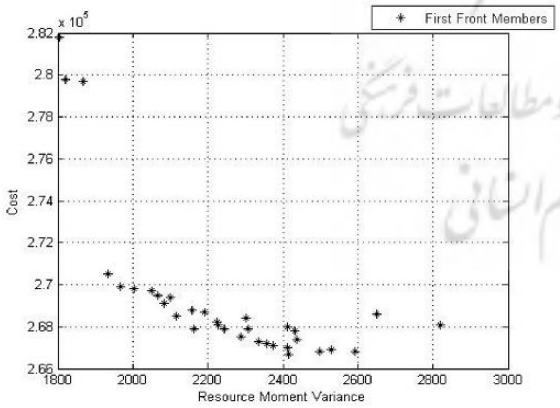
در مقایسهٔ نتایج این تحقیق با نتایج حاصل از مطالعهٔ موردی که در تحقیق چن و ونگ (۲۰۰۸) ارائه شده است، مشاهده می‌شود که هم از نظر زمان و هم از نظر هزینه، راه حل‌های ارائه‌شده جواب‌های بهتری ارائه داده‌اند که در شکل (۹) مشاهده می‌شود. درواقع، در این مثال مشاهده شد که با افزایش ظرفیت منابع، زمان پروژه کاهش می‌یابد که امری پذیرفتنی است.



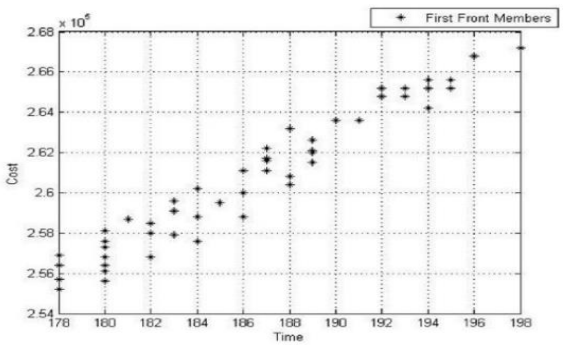
شکل ۳– نمودار زمان–هزینه با ۱۲ نفر



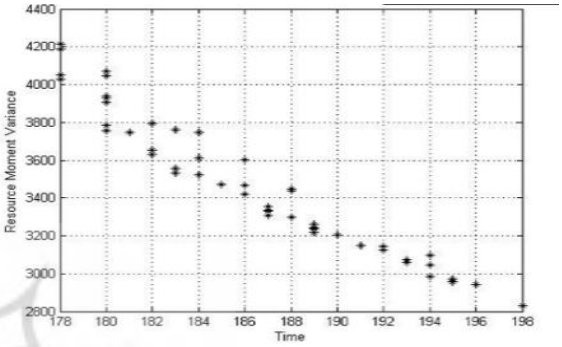
شکل ٤– نمودار زمان–نوسانات لنگر منبع با ۱۲ نفر



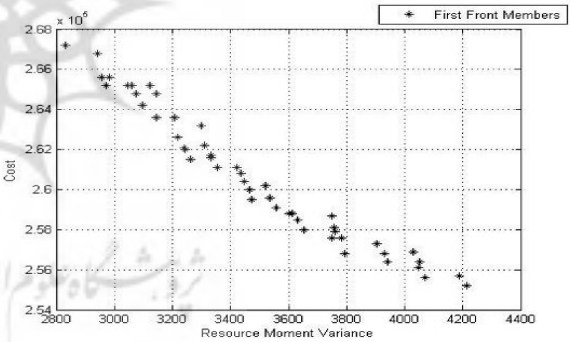
شکل ۵– نمودار نوسانات لنگر منابع–هزینه با ۱۲ نفر



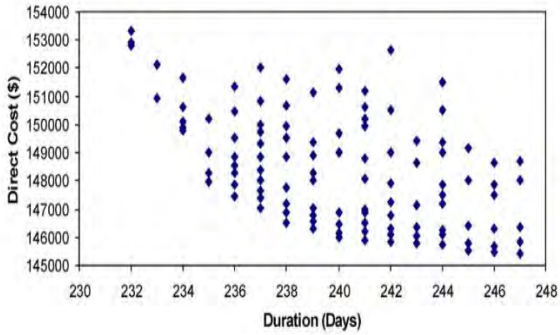
شکل ٦- نمودار زمان-هزینهٔ منابع با ۱۵ نفر



شکل ۷- نمودار زمان-گشتاور منابع با ۱۵ نفر



شکل ۸- نمودار گشتاور منابع-هزینه با ۱۵ نفر



شکل ۹- حل مدل مطالعه موردی توسط چن و ونگ(۲۰۰۸)

۷- نتایج و پیشنهادها

در این تحقیق با استفاده از آنالیز زمان-هزینهٔ ناپیوسته، زمان پروژه، منابع تجدیدشدنی و هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم توأمان در یک مدل گنجانده شد و ارتباط بین این عوامل مدنظر قرار گرفت. درواقع این تحقیق، موضوع موازنه اهداف چندگانه و فعالیت‌های چندحالته دارای روابط پیش‌نیازی عمومی و حل آن با استفاده از ابزار شبیه‌سازی و الگوریتم فراابتکاری را بررسی کرد . همچنین در این مقاله به طراحی مدل ریاضی زمان‌بندی پروژه با استفاده از رویکرد ترکیبی بهینه‌سازی چندهدفه و فعالیت‌های دارای چندین حالت اجرای فعالیت‌های پروژه با قید روابط پیش‌نیازی به‌طوری که منجر به تحقق حالت‌هایی بهینه برای اهداف چندگانه پروژه شوند، پرداخت. در این تحقیق، برای هر فعالیت حالت‌های گوناگون اجرا با هزینه‌ها، منابع استفاده‌شده و زمان‌های متفاوت در هر حالت (که در آن‌ها زمان اجرای فعالیت‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند) جهت انطباق با شرایط واقعی در نظر گرفته شد. گفتنی است که در کنار محدودیت منابع، کاهش نوسانات در مصرف منابع با توجه به هزینه‌های توقف و شروع به کار مجدد، امری مطلوب است. یک مدیر پروژه مجرب ترجیح می‌دهد تغییرات مصرف منبع در حدود تعیین‌شده، کم باشد.

در ادامه برخی از پیشنهادهای سازنده و کاربردی که می‌تواند برای ادامه پژوهش بر روی موضوع این تحقیق استفاده شود، ارائه می‌شود:

۱-در این تحقیق، در زمان‌بندی و کدبرداری از کروموزوم‌ها از روش زمان‌بندی پیشرو استفاده شد؛ ولی گاهی زمان‌بندی پسرو زمان‌بندی بهتری را به دست می‌آورد.

۲-روش استفاده‌شده در این تحقیق برای تسطیح نسبتاً ساده بوده و روش‌های پیشرفته‌تر می‌تواند موجب کاربردی‌ترشدن آن شود.

۳-بهتر است در تحقیقات بعدی، دو روش موجود با حل توسط نرم‌افزار تجاری مانند لینگو نیز بررسی گردد تا قدرت جواب‌های به‌دست‌آمده تأیید شود.

٤-در ادامه می‌توان از ترکیب شبیه‌سازی و الگوریتم فراابتکاری به‌طوری که از جواب‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی به‌عنوان یک جمعیت اولیهٔ مناسب‌تر که به الگوریتم فراابتکاری در یافتن پاسخ‌های بهتر و مناسب‌تر سرعت دهد.

۵-در این تحقیق، تخصیص منابع محدود بوده و به غیر از زمان، شناوری فعالیت، ریسک فعالیت و کیفیت فعالیت می‌تواند در نظر گرفته شود.

Refernces

کاظمی، محمدعلی.(۱۳۸٤). بهینه‌سازی رابطهٔ هزینه-زمان در پروژه‌های بزرگ عمرانی، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکدهٔ عمران.

Ballestín, F., Valls , V., & Quintanilla, S. (2006). Due Dates and RCPSP. In J. Józefowska , & J. Weglarz (Eds.), Perspectives in Modern Project Scheduling (pp. 79-104). Berlin, Germany: Springer.

Banks, J. (1998). Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. (J. Banks , Ed.) Copublished by Engineering & management press, John Wiley and Sons Inc

Nonobe, K., & Ibaraki, T. (2006). A Metaheuristic Approach to the Resource Constrained Project Scheduling with Variable Activity Durations and Convex Cost Functions. In J. Józefowska , & J. Weglarz (Eds.), Perspectives in Modern Project Scheduling (pp. 225-248). Berlin, Germany: Springer.

Achuthan, N., & Hardjawidjaja, A. (2001). "Project Scheduling under Time Dependent Costs - A Branch and Bound Algorithm". *Annals of Operations Research*, 108(1-4), 55˚74.

Akkan , C., Drexl , A., & Kimms , A. (2005). "Network decomposition-based benchmark results for the discrete time˚ cost tradeoff problem". *European Journal of Operational Research, 165*(2), 339-358.

Bomsdorf, F., & Derigs, U. (2008). "A model, heuristic procedure and decision support system for solving the movie shoot scheduling problem". *OR Spectrum*, 30(4), 751-772.

Chen , P. H., & Weng, H. (2009). "A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling". *Automation in Construction*, 18(4), 485˚498.

Demeulemeester, E., De Reyck, B., Foubert, B., Herroelen, W., & Vanhoucke, M. (1998). "New computational results on the discrete time/cost trade-off problem in project networks". *Journal of the Operational Reserch Society, 49*(11), 1153-1163.

Dodin, B., & Elimam, A. A. (2001). "Integrated Project Scheduling and Material Planning with Variable Activity Duration and Rewards". *IIE Transactions, 33*(11), 1005-1018.

Dorndorf, U., Pesch, E., & Phan-Huy, T. (2000). "A Time-Oriented Branch-and-Bound Algorithm for Resource-Constrained Project Scheduling with Generalised Precedence Constraints". *Management Science, 46*(10), 1365˚1384.

Eshtehardian, E., Afshar, A., & Abbasnia, R. (2008). "Time˚cost optimization: using GA and fuzzy sets theory for uncertainties in cost". *Construction Management and Economics, 26*(7), 679-691.

Kis, T. (2005). "A branch-and-cut algorithm for scheduling of projects with variable-intensity activities". *Mathematical Programming, 103*(3), 515-539.

Kolisch , R. (2000). "Integrated scheduling, assembly area- and part-assignment for large-scale, make-to-order assemblies". *International Journal of Production Economics, 64*(1-3), 127-141.

Neumann, K., & Zimmermann, J. (2002). "Exact and truncated branch-and-bound procedures for resource-constrained project scheduling with discounted cash flows and general temporal constraints". *Central European Journal of Operations Research, 10*(4), 357-380.

Prabuddha , D., Dunne, E. J., Ghosh, J. B., & Wells, C. E. (1997). "Complexity of the Discrete Time-Cost Tradeoff Problem for Project Networks". *Operations Research, 45*(2), 302-316.

Rummel , J. L., Walter , Z., Dewan , R., & Seidmann, A. (2005). "Activity consolidation to improve responsiveness". *European Journal of Operational Research, 161*(3), 683-703.

Tareghian , H. R., & Taheri , S. H. (2007). "A solution procedure for the discrete time, cost and quality tradeoff problem using electromagnetic scatter search". *Applied Mathematics and Computation,* 190(2), 1136-1145.

Vanhoucke, M., Demeulemeester, E., & Herroelen, W. (2001). "An Exact Procedure for the Resource-Constrained Weighted Earliness˚Tardiness Project Scheduling Problem". *Annals of Operations Research,* 102(1-4), 179-196.

Viana , A., & de Sousa , J. P. (2000). "Using metaheuristics in multiobjective resource constrained project scheduling". *European Journal of Operational Research,* 120(2), 359-374.

Voß, S., & Witt, A. (2007). "Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application". *International Journal of Production Economics,* 105(2), 445-458.

Wuliang, P., & Chengen, W. (2009). "A multi-mode resource-constrained discrete time˚ cost tradeoff problem and its genetic algorithm based solution". *International Journal of Project Management,* 27(6), 600-609.

Zheng, D., Ng, S., & Kumaraswamy, M. (2004). "Applying a Genetic Algorithm-Based Multiobjective Approach for Time-Cost Optimization". *Construction Engineering and Management,* 130(2), 168˚176.

---

[1]- The weighted tardiness
[2]- Ballestín, Valls, & Quintanilla
[3]- Kolisch
[4]- Nudtasomboon & Randhawa
[5]- Viana & de Sousa
[6]- The maximum lateness and the weighted total tardiness
[7]- The weighted sum of all earliest and tardiness values
[8]- Vanhoucke, Demeulemeester, & Herroelen
[9]- Sum of the earliest and tardiness values
[10]- Davis, Stam, & Grzybowski
[11]- Neumann & Zimmermann
[12]- Minimum the units of cach resource that exceed a given level
[13]- Bomsdorf & Derigs
[14]- The number and length of the gaps
[15]- Akkan, Drexl, & Kimms
[16]- Demeulemeester, De Reyck, Foubert, Herroelen, & Vanhoucke
[17]- Tareghian & Taheri
[18]- Nonobe & Ibaraki
[19]- Rummel, Walter, Dewan, & Seidmann
[20]- Multiple object
[21]- Vob & Witt
[22]- Setup costs
[23]- Pareto-optimal
[24]- Mean weighted tardiness
[25]- Dorndorf, Pesch, & Phan-Huy
[26]- Prabuddha, Dunne, Ghosh, & Wells
[27]- Zheng, Ng, & Kumaraswamy
[28]- Adaptive Weight Approach
[29]- Modified Adaptive weight Approach
[30]- Eshtehardian, Afshar, & Abbasnia
[31]- Wuliang & Chengen
[32]- Enterprise Dynamic
[33]- Activity-on-the-node
[34]- Finish to start
[35]- Lag
[36]- Multi-mode Resource-Constrainted Projected Scheduling Problem
[37]- Moment
[38]- Chen & Weng