

Project scheduling with limited resources

Kiana Ahghari

Faculty of Engineering, Higher Education and Development
Institute, Hamedan, Iran

*Corresponding author's email address:
k.ahghari@gmail.com

Abstract

Scheduling a project with limited resources is an NP issue. One of the innovative approaches to solve this problem is to use the rules of prioritization in planning activities. In this paper, eleven prioritization rules are implemented in two methods, in series and in parallel, and we compare these methods with the criterion of completing the project in a shorter time, by one hundred and twenty standardized test questions containing 30 to 120 activities. The results show that, firstly, the parallel approach is more effective in applying prioritization rules than the series approach. Second, in order to benefit from the greater efficiency of the parallel approach, it is sufficient to apply a maximum of three arbitrary prioritization rules in parallel.

Keywords

Project scheduling, limited resources, innovative problem solving approaches

زمان بندی پروژه با منابع محدود

کیانا احقری

دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی عمران و توسعه، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸

چکیده

زمان بندی پروژه با منابع محدود یک مسأله NP است. یکی از رویکردهای ابتکاری حل این مسأله استفاده از قواعد اولویت بندی در برنامه ریزی فعالیتهاست. در این مقاله پازده قاعده اولویت بندی را به دو شیوه سری و موازی به صورت ایستا پیاده سازی کرده و این شیوه ها را با معیار تکمیل پروژه در زمان کوتاهتر، به وسیله یکصد و بیست مسأله آزمون استاندارد حاوی ۳۰ تا ۱۲۰ فعالیت، با یکدیگر مقایسه کرده ایم. نتایج به دست آمده نشان می دهد که اولاً رویکرد موازی در به کارگیری قواعد اولویت بندی از رویکرد سری کارآمدتر است. ثانیاً به منظور بهره جستن از کارایی بیشتر رویکرد موازی، تنها کفایت حداکثر سه قاعده اولویت بندی دلخواه به صورت موازی به کار گرفته شوند.

کلمات کلیدی

زمان بندی پروژه، منابع محدود، رویکردهای ابتکاری حل مسأله



5 (1), 2020

دوره ۵، شماره ۱
بهار ۱۳۹۹

فصلنامه پژوهشی



محدود برای انجام هر فعالیت مثل i به r_{ik} واحد از منبع k ، $k = 1, \dots, m$ ، در هر واحد زمان از مدت زمان اجرای آن فعالیت (d_i) نیاز است. این در حالیست که منبع k دارای محدودیت b_k در هر واحد زمان است. متغیرهای d_i ، r_{ik} و b_k نامنفی و معین هستند. هدف این مسأله غالباً تعیین زمان شروع و حالت اجرای هر فعالیت به گونه ای است که زمان اجرای پروژه را کمینه نماید. واضح است که پاسخ این مسأله باید قیود مربوط به ارتباط منطقی فعالیتها را تأمین کند، و به محدودیت منابع نیز توجه داشته باشد. مسأله زمان بندی پروژه با منابع محدود، با توجه به شرایط متفاوت، به صورتهای مختلف مدلسازی می شود. در اینجا فرض می کنیم پروژه به صورت یک شبکه فعالیت - روی - گره^{۱۱} مثل گراف $G = (V, E)$ که در آن V مجموعه گرهها و بیانگر فعالیتها پروژه و E مجموعه یالها و بیانگر روابط منطقی بین فعالیتهاست، تعریف شده باشد. فعالیتها از ۱ تا n شماره گذاری شده اند. فعالیتهای ۱ و n مجازی هستند و شروع و پایان پروژه را نشان می دهند. فعالیتها پس از شروع تا پایان چرخه عمر خود بدون وقفه اجرا می شوند. کلیه رابطه های کنترل پیش گفته در تبیین رابطه های منطقی مابین فعالیتها پروژه نقش دارند. در چنین شرایطی این مسأله را می توان به صورت زیر مدلسازی کرد:

۱- مقدمه

مسأله زمان بندی پروژه با منابع محدود^۱ یک مسأله NP است و برای نخستین بار در سال ۱۹۶۳ مطرح شد [۱]. این مسأله "یکی از پیچیده ترین مسائل تحقیق در عملیات است که در دهه های اخیر پیشرفتهای قابل توجهی در تدوین روشهای حل دقیق و ابتکاری آن به وجود آمده و اخیراً روشهای جدید بهینه سازی در حل آن به کار گرفته شده اند" [۲]. در این مسأله، پروژه به کمک روشهایی مانند روش شکست کار^۲ به تعدادی فعالیت تجزیه می شود. این فعالیتها به لحاظ روابط منطقی متفاوتی که حاکم بر آنهاست با یکدیگر ارتباط پیدا می کنند. رابطه های منطقی و بلا فصل بین هر دو فعالیت به کمک یک یا چند رابطه کنترل کننده مانند رابطه پایان به شروع^۳، رابطه شروع به شروع^۴، رابطه پایان به پایان^۵، و رابطه شروع به پایان^۶ تبیین می شوند. البته در پروژه های پیچیده تر امکان تعریف رابطه های کنترل کننده بیشتری مانند توازی اجرا بین دو فعالیت^۷ وجود دارد [۳]. برای اجرای هر فعالیت به منابع متفاوتی از قبیل زمان، سرمایه، نیروی انسانی و ... نیاز است. این منابع غالباً به دو دسته تجدیدشدنی^۸ مثل نیروی انسانی و تجدیدنشدنی^۹ مانند سرمایه تقسیم می شوند. هر فعالیت می تواند در چندین حالت^{۱۰} مختلف مثلاً به صورت دستی، نیمه مکانیزه و یا مکانیزه اجرا شود. اجرای هر حالت نیازمند نوع و میزان منابع متفاوتی است [۴]. در مسأله برنامه ریزی پروژه با منابع

$$\text{Min } t_n \quad (1)$$

subject to:

$$t_j - t_i \geq d_j - d_i + SS_{ij}, \quad \forall (i, j) \in R_1 \quad (2)$$

$$t_j - t_i \geq -d_i + SF_{ij}, \quad \forall (i, j) \in R_2 \quad (3)$$

$$t_j - t_i \geq d_j + FS_{ij}, \quad \forall (i, j) \in R_3 \quad (4)$$

$$t_j - t_i \geq FF_{ij}, \quad \forall (i, j) \in R_4 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in A_k} r_{ik} \leq b_k, \quad k = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$t_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

که در آن متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

n	:	تعداد فعالیت‌های پروژه.
m	:	انواع منابع.
d_i	:	مدت زمان انجام فعالیت i ($i = 1, \dots, n$).
t_i	:	زمان شروع فعالیت i .
r_{ik}	:	مقدار نیاز فعالیت i به منبع k .
b_k	:	موجودی منبع تجدیدشدنی k .
A_t	:	مجموعه فعالیت‌هایی که در فاصله زمانی $[t - 1, t]$ انجام می‌شوند $A_t = \{i \mid f_i - d_i < t \leq f_i\}$ که در آن f_i مدت زمان لازم جهت انجام فعالیت i است.
R_i	:	مجموعه زوج فعالیت‌هایی که بین آنها به ترتیب رابطه‌های شروع به شروع، شروع به پایان، پایان به شروع و پایان به پایان برقرار است ($i = 1, \dots, 4$).



5 (1), 2020

دوره ۵، شماره ۱

بهار ۱۳۹۹

فصلنامه پژوهشی



بسیاری از رویکردهای ابتکاری حل مساله برنامه‌ریزی پروژه با منابع محدود در سال ۲۰۰۶ میلادی مورد بررسی قرار گرفتند [۱۲]. آنها این رویکردها را در چهار گروه با عناوین (۱) رویکردهای مبتنی بر قواعد اولویت‌بندی^{۱۲} مانند روش نمونه‌گیری تصادفی [۱۳]؛ (۲) رویکردهای مبتنی بر روش‌های ابر ابتکاری^{۱۳} مانند الگوریتم ژنتیک [۱۴-۱۵]، مانند الگوریتم جستجوی ممنوع [۱۶]؛ مانند الگوریتم شبیه سازی تبریدی [۱۷]؛ مانند الگوریتم مورچه^{۱۴} [۱۸]؛ (۳) رویکردهای مبتنی بر روش‌های ابتکاری غیر متعارف^{۱۵} مانند روش‌های مبتنی بر جستجوی محلی [۱۹]؛ مانند روش‌های تکاملی و مبتنی بر جمعیتی از جواب مثل الگوریتم جستجوی پراکنده^{۱۶} [۲۰]؛ و بالاخره (۴) رویکردهای مبتنی بر سایر روش‌های ابتکاری مانند بهسازی پیشرو پسرو^{۱۷} [۲۱]؛ مانند روش‌های تجزیه شبکه [۲۲]؛ دسته‌بندی کردند. در ادامه مقاله حاضر، قواعد اولویت‌بندی از گروه ۱ را مورد بررسی بیشتر قرار می‌دهیم تا به طور خاص عملکرد آنها را در شرایطی که به صورت سری و به صورت موازی پیاده‌سازی شده‌اند، با یکدیگر مقایسه کنیم.

با توجه به (۱)، هدف مساله مدل سازی شده در ۱-۶ کمینه سازی زمان تکمیل پروژه است. در این مدل قیدهای ۲ تا ۵ بیانگر روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها و قید ۶ نیز بیان‌کننده برقراری محدودیت منابع است.

۳- پیشینه مساله

مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود پیشینه‌ای بیش از ۴۰ سال دارد. برای حل این مساله دو رویکرد بهینه و ابتکاری وجود دارند [۵]. حل مصادیق واقعی این مساله به دلیل پیچیدگی، گستردگی و دشواری با رویکردهای بهینه نظیر برنامه‌ریزی ریاضی، برنامه ریزی پویا و یا شاخه و کران غیر عملی است [۶]. البته در ادبیات موضوع کاربرد رویکردهای بهینه در حل مصادیق کوچکتر این مساله نیز گزارش شده است. به عنوان نمونه، خواننده علاقمند را به [۷] در خصوص برنامه‌ریزی ریاضی، به [۸-۹] در خصوص روش‌های شمارشی مثل برنامه‌ریزی پویا و به [۱۰-۱۱] در خصوص روش‌های شاخه و کران ارجاع می‌دهیم. به دلیل ناکارآمد بودن رویکردهای بهینه، اکثر مسائل واقعی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با رویکردهای ابتکاری حل می‌شوند.

۴- قواعد اولویت‌بندی و نحوه پیاده‌سازی آنها

استفاده از قواعد اولویت‌بندی در تخصیص منابع در پروژه‌هایی که با محدودیت منابع روبرو هستند، یکی از رویکردهای ابتکاری حل مساله برنامه‌ریزی پروژه با منابع محدود است. در این رویکرد، در هر مقطع زمانی از چرخه عمر پروژه که می‌خواهیم فعالیتها را از نظر نیاز به منابع، برنامه‌ریزی کنیم، به دلیل محدودیت منابع، نمی‌توانیم به کلیه فعالیت‌های واجد شرایط، منابع مورد نیازشان را تخصیص دهیم. بنابراین لازم می‌آید تا ترکیب مناسبی از فعالیتها را جهت تخصیص منابع انتخاب کنیم. این انتخاب به کمک قواعد اولویت‌بندی صورت می‌گیرد. قواعد اولویت‌بندی بسیاری وجود دارند که در ادبیات موضوع به ۱۱ قاعده بیشتر اشاره شده است (مشخصات این قواعد در پیوستار آمده است). سوالاتی که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارتند از: "آیا در برنامه‌ریزی منابع با رویکرد قواعد اولویت‌بندی از یک قاعده استفاده کنیم یا بهتر است تا ترکیبی از آنها را مورد استفاده قرار دهیم؟ و در صورتی که استفاده ترکیبی آنها مناسبتر باشد چند قاعده را به صورت ترکیبی به کار بگیریم؟"

در این مقاله از طریق حل مسائل آزمون بدواً ترکیب مناسبی از قواعد اولویت‌بندی را شناسایی می‌کنیم. برای این منظور قواعد اولویت‌بندی پیش‌گفته را با دو رویکرد سری و موازی پیاده‌سازی می‌کنیم. در رویکرد سری، در کلیه مقاطع برنامه‌ریزی از چرخه عمر پروژه، از یک قاعده اولویت‌بندی ثابت استفاده می‌کنیم. در برنامه‌ریزی فعالیتها به صورت موازی، ترکیب مناسبی از قواعد اولویت‌بندی را به کار می‌گیریم. برای تعیین ترکیب مناسبی از این قواعد به صورت زیر عمل می‌کنیم. ابتدا در رویکرد سری، قواعد اولویت‌بندی را مستقلاً بررسی می‌کنیم تا قواعدی را که نسبت به سایر قواعد، از عملکرد بهتری برخوردارند، شناسایی کنیم. معیار

سنجش عملکرد بهتر، تکمیل پروژه در زمان کوتاهتر است. برای ارزیابی عملکرد ۱۱ قاعده اولویت‌بندی، چهار مجموعه مسائل آزمون استاندارد با معیارهای پیچیدگی متفاوت و حاوی مسائل ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ فعالیتی که توسط باکتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، را به کار می‌گیریم [۲۳]. یادآوری می‌کنیم که در تولید هر مجموعه، پارامترهای مسائل به کمک طرح آزمون فاکتوریل^{۱۸} مقداردهی شده‌اند [۲۴]. این مسائل برای ارزیابی رویکردهای ابتکاری حل این مساله، توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند و از کتابخانه زمان‌بندی پروژه قابل پیاده‌سازی هستند [۲۵].

۵- بحث و بررسی نتایج

به منظور ارزیابی عملکرد قواعد اولویت‌بندی و پاسخگویی به سوالات مطرح شده، ۱۳۲۰ اجرا (برای هر یک از یازده قاعده اولویت‌بندی، ۳۰ اجرای تصادفی به ازای هر مجموعه مساله آزمون) از مسائل آزمون را به کار می‌گیریم. در این اجراها، قواعد به صورت ایستا پیاده‌سازی می‌شوند، یعنی با گذر زمان مقادیر مربوط به معیارهای اولویت‌بندی تغییر نکرده و همان مقادیر اولیه خود را حفظ می‌کنند. نتایج حاصل از ارزیابی قواعد اولویت‌بندی در رویکرد سری در جدولهای ۱ تا ۴ آمده است. این جداول تعداد مسائلی را که جواب حاصل از حل آنها به کمک هر یک از قواعد اولویت‌بندی در مقایسه با سایر جوابها از نظر کیفیت در رتبه‌های ۱ تا ۵ قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهند. در این جداول، احتمال وجود بهترین جواب در رتبه‌های ۱ تا ۵، P نیز آورده شده است. در جدول ۱ ملاحظه می‌کنیم که جوابهای حاصل از به کارگیری مثلاً قواعد اولویت‌بندی ۳، ۶ و ۷ با احتمالی بیش از ۷۶٪ در بین ۵ جواب بهتر قرار گرفته‌اند. این در حالی است که جوابهای حاصل از به کارگیری قاعده اولویت‌بندی ۱ تنها با احتمالی قریب به ۴۳٪ در بین ۵ جواب بهتر می‌باشد.

جدول ۱ نتایج حاصل از ۳۳۰ اجرای مسائل آزمون ۳۰ فعالیتی.

رتبه ۱	رتبه‌های ۱-۲		رتبه‌های ۱-۳		رتبه‌های ۱-۴		رتبه‌های ۱-۵		قاعده
	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	
۱	۲	۰.۰۶۷	۶	۰.۲۰۰	۷	۰.۲۳۳	۱۳	۰.۴۳۳	۱
۲	۸	۰.۲۶۷	۱۶	۰.۵۳۳	۱۹	۰.۶۳۳	۲۱	۰.۷۰۰	۲
۳	۵	۰.۱۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۲۱	۰.۷۰۰	۲۳	۰.۷۶۷	۳
۴	۱	۰.۰۳۳	۱۲	۰.۴۰۰	۱۳	۰.۴۳۳	۱۷	۰.۵۶۷	۴
۵	۷	۰.۱۶۷	۱۴	۰.۴۶۷	۱۷	۰.۵۶۷	۲۱	۰.۷۰۰	۵
۶	۱	۰.۰۳۳	۸	۰.۲۶۷	۱۴	۰.۴۶۷	۲۳	۰.۷۶۷	۶
۷	۵	۰.۱۶۷	۱۵	۰.۵۰۰	۲۰	۰.۶۶۷	۲۳	۰.۷۶۷	۷
۸	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۱۰	۰.۳۳۳	۱۴	۰.۴۶۷	۸
۹	۲	۰.۰۶۷	۸	۰.۲۶۷	۱۵	۰.۵۰۰	۱۶	۰.۵۳۳	۹
۱۰	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۸	۰.۶۰۰	۱۰
۱۱	۹	۰.۳۰۰	۱۷	۰.۵۶۷	۲۳	۰.۷۶۷	۳۰	۱.۰۰۰	۱۱

جدول ۲ نتایج حاصل از ۳۳۰ اجرای مسائل آزمون ۶۰ فعالیتی.

رتبه	رتبه‌های ۱ - ۲		رتبه‌های ۱ - ۳		رتبه‌های ۱ - ۴		رتبه‌های ۱ - ۵		قاعده
	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	
۱	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۱	۰.۳۶۷	۱۶
۲	۹	۰.۳۰۰	۱۲	۰.۴۰۰	۱۸	۰.۶۰۰	۲۲	۰.۷۳۳	۲۵
۳	۲	۰.۰۶۷	۵	۰.۱۶۷	۱۰	۰.۳۳۳	۱۲	۰.۴۰۰	۱۲
۴	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۵	۰.۱۶۷	۸	۰.۲۶۷	۹
۵	۲	۰.۰۶۷	۳	۰.۱۰۰	۵	۰.۱۶۷	۹	۰.۳۰۰	۱۳
۶	۳	۰.۱۰۰	۸	۰.۲۶۷	۱۳	۰.۴۳۳	۱۵	۰.۵۰۰	۱۹
۷	۷	۰.۲۳۳	۱۱	۰.۳۶۷	۱۵	۰.۵۰۰	۱۶	۰.۵۳۳	۲۲
۸	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۸
۹	۳	۰.۱۰۰	۵	۰.۱۶۷	۷	۰.۲۳۳	۱۲	۰.۴۰۰	۱۵
۱۰	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷	۷	۰.۲۳۳	۱۰	۰.۳۳۳	۱۱
۱۱	۵	۰.۱۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۳	۰.۴۳۳	۱۸	۰.۶۰۰	۲۳

جدول ۳ نتایج حاصل از ۳۳۰ اجرای مسائل آزمون ۹۰ فعالیتی.

رتبه	رتبه‌های ۱ - ۲		رتبه‌های ۱ - ۳		رتبه‌های ۱ - ۴		رتبه‌های ۱ - ۵		قاعده
	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	
۱	۳	۰.۱۰۰	۶	۰.۲۰۰	۹	۰.۳۰۰	۱۲	۰.۴۰۰	۱۹
۲	۳	۰.۱۰۰	۶	۰.۲۰۰	۱۴	۰.۴۶۷	۱۹	۰.۶۳۳	۲۵
۳	۲	۰.۰۶۷	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۰	۰.۳۳۳	۱۱
۴	۱	۰.۰۳۳	۵	۰.۱۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۳	۰.۴۳۳	۱۸
۵	۰	۰.۰۰۰	۲	۰.۰۶۷	۳	۰.۱۰۰	۴	۰.۱۳۳	۹
۶	۲	۰.۰۶۷	۵	۰.۱۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۴	۰.۴۶۷	۱۸
۷	۱۰	۰.۳۳۳	۱۳	۰.۴۳۳	۲۰	۰.۶۶۷	۲۵	۰.۸۳۳	۲۷
۸	۲	۰.۰۶۷	۲	۰.۰۶۷	۲	۰.۰۶۷	۲	۰.۰۶۷	۴
۹	۰	۰.۰۰۰	۴	۰.۱۳۳	۱۱	۰.۳۶۷	۱۴	۰.۴۶۷	۱۷
۱۰	۲	۰.۰۶۷	۴	۰.۱۳۳	۴	۰.۱۳۳	۸	۰.۲۶۷	۱۳
۱۱	۵	۰.۱۶۷	۱۰	۰.۳۳۳	۱۶	۰.۵۳۳	۲۰	۰.۶۶۷	۲۳

جدول ۴ نتایج حاصل از ۳۳۰ اجرای مسائل آزمون ۱۲۰ فعالیتی.

رتبه	رتبه‌های ۱ - ۲		رتبه‌های ۱ - ۳		رتبه‌های ۱ - ۴		رتبه‌های ۱ - ۵		قاعده
	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	
۱	۰	۰.۰۰۰	۵	۰.۱۶۷	۸	۰.۲۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۴
۲	۵	۰.۱۶۷	۱۲	۰.۴۰۰	۱۳	۰.۴۳۳	۱۶	۰.۵۳۳	۱۹
۳	۳	۰.۱۰۰	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۷	۰.۲۳۳	۱۱
۴	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۰	۰.۳۳۳	۱۷	۰.۵۶۷	۲۱
۵	۰	۰.۰۰۰	۰	۰.۰۰۰	۱	۰.۰۳۳	۵	۰.۱۶۷	۷
۶	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۳	۰.۴۳۳	۱۹	۰.۶۳۳	۲۲
۷	۹	۰.۳۰۰	۱۶	۰.۵۳۳	۲۲	۰.۷۳۳	۲۴	۰.۸۰۰	۲۸
۸	۰	۰.۰۰۰	۰	۰.۰۰۰	۱	۰.۰۳۳	۱	۰.۰۳۳	۲
۹	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷	۷	۰.۲۳۳	۱۱	۰.۳۶۷	۱۴
۱۰	۰	۰.۰۰۰	۱	۰.۰۳۳	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷	۳
۱۱	۶	۰.۲۰۰	۱۴	۰.۴۶۷	۱۷	۰.۵۶۷	۱۹	۰.۶۳۳	۲۳

جدول ۱ نشان می‌دهد که در مسائل با تعداد فعالیت کمتر (۳۰ فعالیت)، جوابهای حاصل از به کارگیری قاعده اولویت‌بندی ۱۱، به یقین در بین ۵ جواب برتر قرار دارد. این در حالی است که در مسائل با فعالیت بیشتر (جدول ۲، ۳ و ۴)، جوابهای حاصل از به کارگیری قاعده اولویت‌بندی ۱۱ تنها با احتمال ۷۶٪ در بین ۵ جواب بهتر قرار می‌گیرد. جدول ۵ رتبه‌بندی قواعد اولویت‌بندی در حل مسائل ۳۰ تا ۱۲۰ فعالیتی را نشان می‌دهد. به طور مثال در مسائل ۳۰ فعالیتی پس از پیاده‌سازی ۱۱ قاعده اولویت‌بندی و مرتب‌کردن آنها بر حسب زمان تکمیل پروژه قواعد ۱۱، ۳، ۶، ۷، ۲، ۵، ۱۰، ۴، ۹، ۸ و ۱ به‌ترتیب در رتبه‌های اول تا یازدهم قرار می‌گیرند. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که به کارگیری سری قواعد اولویت‌بندی ۲، ۶، ۷ و ۱۱ در حل مسائل مختلف جوابهایی را به دست داده است که از نظر کیفیت همواره در ۵ رتبه اول قرار داشته است (در زوج پرانتر قرار داده شده اند). از طرفی به کارگیری سری قواعد اولویت‌بندی ۵،

۸، ۹ و ۱۰ در حل مسائل مختلف جوابهایی را به دست داده است که از نظر کیفیت همواره در ۵ رتبه آخر قرار داشته‌اند (در زوج قرار گرفته اند). حال که عملکرد قواعد اولویت‌بندی را که به صورت سری پیاده‌سازی شده‌اند، با یکدیگر مقایسه کرده و بهترین آنها یعنی قواعد ۲، ۶، ۷ و ۱۱ را مشخص کرده‌ایم، عملکرد ترکیبی آنها را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. در پیاده‌سازی رویکرد موازی و به کارگیری ترکیبی از قواعد، از ترکیبات ۲تایی، ۳تایی و ۴تایی استفاده کرده‌ایم. نتایج حاصل در جدول ۶ آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که مثلاً ترکیب دو قاعده ۲ و ۶ توانسته است در ۱۹ پروژه از ۳۰ پروژه سی فعالیتی و با احتمال ۶۳ درصد جواب بهتری نسبت به بهترین جواب حاصل از پیاده‌سازی سری یازده قاعده اولویت‌بندی بر روی همان مسائل به‌دست آورد.

جدول ۵ رتبه‌بندی قواعد اولویت‌بندی در حل مسائل مختلف.

مسائل رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
۳۰ فعالیتی	(۱۱)	۳	(۶)	(۷)	(۲)	<۵>	<۱۰>	۴	<۹>	<۸>	۱
۶۰ فعالیتی	(۲)	(۱۱)	(۷)	(۶)	۱	<۹>	<۵>	۳	<۱۰>	۴	<۸>
۹۰ فعالیتی	(۷)	(۲)	(۱۱)	۱	(۶)	۴	<۹>	<۱۰>	۳	<۵>	<۸>
۱۲۰ فعالیتی	(۷)	(۱۱)	(۶)	۴	(۲)	۱	<۹>	۳	<۵>	<۱۰>	<۸>

جدول ۶ تعداد مسائلی که در استفاده موازی قواعد، جوابشان از بهترین جواب سری بهتر بوده و احتمال مربوطه.

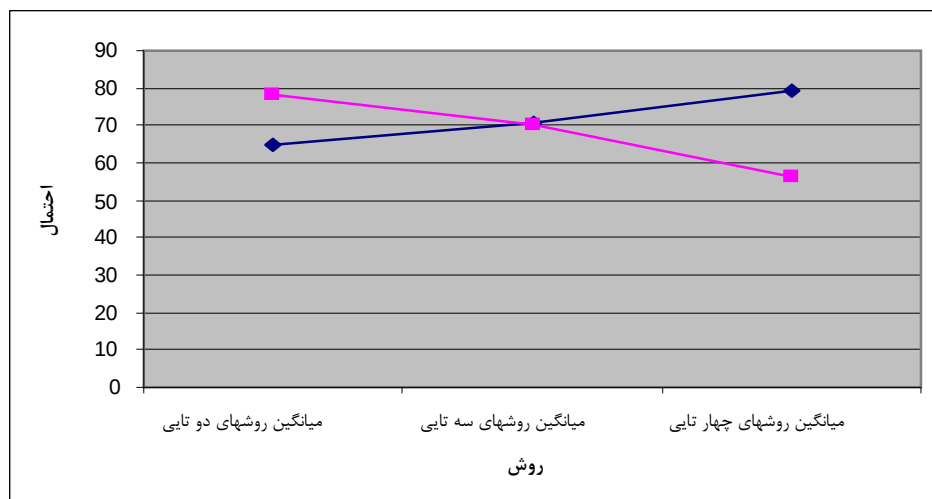
مسائل	۲،۶	۲،۷	۲،۱۱	۶،۷	۶،۱۱	۷،۱۱	۲،۶،۷	۲،۷،۱۱	۶،۷،۱۱	۲،۶،۱۱	۲،۷،۱۱
۳۰ تایی	۱۹	۲۰	۲۰	۱۵	۱۲	۱۴	۱۸	۲۰	۱۴	۲۱	۲۶،۷،۱۱
احتمال	۰،۶۳	۰،۶۷	۰،۶۷	۰،۵۰	۰،۴۰	۰،۴۷	۰،۶۰	۰،۶۷	۰،۴۷	۰،۷۰	۰،۶۷
۶۰ تایی	۲۲	۲۳	۲۰	۱۶	۱۸	۲۰	۲۴	۲۳	۱۹	۱۸	۲۵
احتمال	۰،۷۳	۰،۷۷	۰،۶۷	۰،۵۳	۰،۶۰	۰،۶۷	۰،۸۰	۰،۷۷	۰،۶۳	۰،۶۰	۰،۸۳
۹۰ تایی	۲۲	۲۶	۲۳	۱۹	۱۷	۲۰	۲۱	۲۴	۱۹	۲۷	۲۴
احتمال	۰،۷۳	۰،۸۷	۰،۷۷	۰،۶۳	۰،۵۷	۰،۶۷	۰،۷۰	۰،۸۰	۰،۶۳	۰،۹۰	۰،۸۰
۱۲۰ تایی	۲۲	۲۵	۲۳	۱۷	۲۱	۱۸	۲۳	۲۷	۲۱	۲۱	۲۶
احتمال	۰،۷۳	۰،۸۳	۰،۷۷	۰،۵۷	۰،۷۰	۰،۶۰	۰،۷۷	۰،۹۰	۰،۷۰	۰،۷۰	۰،۸۷
۳۰-۱۲۰	۸۵	۹۴	۸۶	۶۷	۶۸	۷۲	۸۶	۹۴	۷۳	۸۷	۹۵
احتمال	۷۰،۸	۷۸،۳	۷۱،۷	۵۵،۸	۵۶،۷	۶۰	۷۱،۶۷	۷۸،۳۳	۶۰،۸۳	۷۲،۵	۷۹،۱۷

باتوجه به سطر آخر جدول ۶ ملاحظه می‌شود که با به کارگیری موازی قواعد اولویت‌بندی، با احتمال دست کم ۵۵،۸٪ جواب بهتری نسبت به حالتی که این قواعد به صورت سری پیاده‌سازی شده‌اند، حاصل می‌شود. سوالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که آیا کیفیت بهتر جوابها در رویکرد موازی تنها متأثر از به کارگیری ترکیبی قواعد اولویت‌بندی است؟ برای پاسخگویی به این سوال قواعد اولویت‌بندی ۵، ۸، ۹ و ۱۰ که از نظر کیفیت حل مساله همواره در ۵ رتبه آخر قرار داشته‌اند را به صورت ترکیبی به کار می‌گیریم تا ببینیم آیا به کارگیری موازی آنها می‌تواند در کیفیت عملکردشان در حل مسائل تاثیرگذار باشد؟

جدول ۷ نتایج حاصل از به کارگیری ترکیبی این قواعد را نشان می‌دهد. باتوجه به سطر آخر جدول ۷ ملاحظه می‌شود که وقتی همین قواعد اولویت‌بندی به صورت موازی به کار گرفته می‌شوند دست‌کم با احتمال ۵۶٪ جواب بهتری نسبت به حالتی که این قواعد به صورت سری پیاده‌سازی شده‌اند، به‌دست می‌دهد. حال که بر اساس آزمونهای به کار گرفته شده مشخص شد که استفاده موازی قواعد اولویت‌بندی نسبت به استفاده سری آنها عملکرد بهتری را به دست می‌دهد باید سوال دوم را در خصوص این که ترکیب چندتایی این قواعد عملکرد بهتری را نتیجه می‌دهد بررسی کنیم. در شکل ۱ منحنی میانگین احتمال کسب جواب بهتر در رویکرد موازی وقتی ۲، ۳ و ۴ قاعده اولویت‌بندی با هم ترکیب شده‌اند را آورده‌ایم.

جدول ۷ تعداد مسائلی که با استفاده موازی قواعد ۵، ۸، ۹ و ۱۰ عملکرد بهتری نسبت به بهترین جواب سری داشته و احتمال آنها.

مسائل	۱۰، ۸	۸، ۵	۸، ۹	۵، ۱۰	۹، ۱۰	۵، ۹	۵، ۸، ۱۰	۸، ۹، ۱۰	۵، ۹، ۱۰	۵، ۸، ۹، ۱۰
۳۰ تایی	۲۷	۲۸	۲۸	۲۴	۲۴	۲۴	۲۶	۲۲	۲۵	۲۰
احتمال	۰،۹۰	۰،۹۳	۰،۹۳	۰،۸۰	۰،۸۰	۰،۸۰	۰،۸۷	۰،۷۳	۰،۸۳	۰،۶۷
۶۰ تایی	۲۵	۲۶	۲۴	۲۸	۲۴	۲۷	۲۳	۲۳	۲۴	۱۹
احتمال	۰،۸۳	۰،۸۷	۰،۸۰	۰،۹۳	۰،۸۰	۰،۹۰	۰،۷۷	۰،۷۷	۰،۸۰	۰،۶۳
۹۰ تایی	۲۳	۲۶	۲۷	۲۵	۲۹	۲۹	۲۰	۲۴	۲۷	۱۷
احتمال	۰،۷۷	۰،۸۷	۰،۹۰	۰،۸۳	۰،۹۷	۰،۹۷	۰،۶۷	۰،۸۰	۰،۹۰	۰،۵۷
۱۲۰ تایی	۲۲	۲۲	۲۳	۲۶	۲۶	۲۶	۲۳	۲۱	۲۵	۲۳
احتمال	۰،۷۳	۰،۷۳	۰،۷۷	۰،۸۷	۰،۸۷	۰،۸۷	۰،۷۷	۰،۷۰	۰،۸۳	۰،۷۷
۳۰ - ۱۲۰	۹۷	۱۰۲	۱۰۲	۱۰۳	۱۰۳	۱۰۶	۹۲	۹۰	۱۰۱	۷۹
احتمال	۰،۷۵	۰،۸۰	۰،۷۹	۰،۷۷	۰،۷۷	۰،۸۰	۰،۶۹	۰،۶۹	۰،۷۶	۰،۵۶



شکل ۱ منحنی میانگین احتمال کسب جواب بهتر در رویکرد موازی با ترکیب ۲، ۳ و ۴ قاعده اولویت بندی.

همان طور که ملاحظه می شود بدون توجه به کیفیت عملکرد مستقل هر قاعده، ترکیب حداکثر سه قاعده اولویت بندی با احتمال حدود ۷۰ درصد جواب بهتری نسبت به پیاده سازی مستقل و سری همان قواعد به دست می دهد. سؤالی که در حال حاضر محققین مشغول بررسی آن هستند، پیدا کردن حداکثر تعداد قواعدی است که به کارگیری ترکیبی آنها، منجر به کسب بهترین جواب ممکن می گردد.

۶ - نتیجه گیری

در این مقاله دو رویکرد سری و موازی در به کارگیری قواعد اولویت بندی برای حل مساله زمان بندی پروژه با منابع محدود را با یکدیگر مقایسه کرده ایم. نتایج به دست آمده نشان می دهد که اولاً رویکرد موازی در به کارگیری قواعد اولویت بندی نسبت به رویکرد سری از کارایی بیشتری برخوردار است. ثانیاً به منظور بهره جستن از کارایی بیشتر رویکرد موازی تنها کافیست حداکثر سه قاعده اولویت بندی دلخواه به صورت موازی به کار گرفته شوند. نتایج حاصل از این کار تحقیقاتی می تواند در برنامه ریزی پروژه های عمرانی ملی و استانی در ایران به ویژه در موقعیتهایی که منابع مورد نیاز این پروژه ها دارای محدودیت هستند به کار گرفته شوند. در ایران، طی سالیهای ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۳ متوسط تعداد طرحهای عمرانی ملی و استانی در

دست اجرا به ترتیب ۱۸۷۹ و ۱۳۷۵۹ طرح با اعتباراتی معادل ۱۷۹،۸ هزار میلیارد ریال برای طرحهای عمرانی ملی و ۵۹،۹ هزار میلیارد ریال برای طرحهای عمرانی استانی بوده است. به طور متوسط در طول برنامه سوم توسعه، به ترتیب ۶۱،۶ و ۲۹،۸ درصد از پروژه های عمرانی ملی و استانی در سالهای مختلف برنامه نسبت به برنامه زمانی تعیین شده، تاخیر داشته اند. تاخیر در زمان اتمام پروژه ها سبب طولانی شدن مدت اجرای آنها شده (میانگین وزنی مدت اجرای پروژه های عمرانی ملی و استانی خاتمه یافته طی سالهای ۸۳-۷۹ به ترتیب به ۹،۵ و ۳،۲ سال رسیده است) و خسارات عمده ای به اقتصاد کشور وارد می کند. بدیهی است چنانچه به کارگیری اثربخش نتایج این مقاله بتواند تنها ۱٪ از زمان به تاخیر افتادن پروژه ها بکاهد، مقدار قابل توجهی در هزینه های اقتصادی، اجتماعی این پروژه ها صرفه جویی خواهد کرد.

۷ - مراجع

- [1] Wiest, J. D. (1963), *The scheduling of large projects with limited resources*. Ph.D. dissertation, Carnegie Institute of Technology.
- [2] Mohring, R., Schulz, A., Stork, F., and Uetz, M. (2003), *Solving project scheduling problems by minimum cut computations*. Management Science, 49, 3, 330-350.

- [16] Nonobe, K. and Ibaraki, T. (2002), *Formulation and tabu search algorithm for the resource constrained project scheduling problem*. In C. C. Ribeiro and P. Hansen, editors, *Essays and Surveys in Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, 557-588.
- [17] Valls, V., Perez, M. A. and Quintanilla, M. S. (2004), *Justification and RCPSP: A technique that pays*. *European Journal of Operations Research*, 152, 134-149.
- [18] Merkle, D., Middendorf, M. and Schneck, H. (2002), *Ant colony optimization for resourceconstrained project scheduling*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 333-346.
- [19] Fleszar, K. and Hindi, K. (2004), Solving the resource-constrained project scheduling problem by a variable neighbourhood search. *Euro. J. Operational Research*, 155, 402-413.
- [20] Debels, D., De Reyck, B., Leus, R. and Vanhoucke, M. (2006), *A hybrid scatter search Electromagnetism meta-heuristic for project scheduling*. *European Journal of Operational Research*, 169(2), 638-653.
- [21] Tormos P. and Lova, A. (2003), *An efficient multi-pass heuristic for project scheduling with constrained resources*. *International J. of Production Research*, 41, 5, 1071-1086.
- [22] Sprecher, A. (2002), *Network decomposition techniques for resource-constrained project scheduling*. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 4, 405-414.
- [23] Boctor, F. (1990), Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling. *European Journal of O.R.*, 49, 3-13.
- [24] Kolisch, R., Sprecher, A. and Drexel, A. (1995), Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problem. *Mgmt Sci.*, 41, 10, 1693-1703.
- [25] Kolisch, R. and Sprecher, A. (1996), *PSPLIB - A project scheduling problem library*. *European Journal of O.R.*, 96, 205-216.
- [3] Hajdu, M. (1997), *Network Scheduling Techniques for Construction Project Management*. Kluwer Academic Publishers.
- [4] Drexel, A. and Grunewald, J. (1993), Nonpreemptive multi-mode resource constrained project scheduling. *IIE Trans.*, 25, 74-81.
- [5] Herroelen, W., De Reyck, B. and Demeulemeester, E. (1998), *Resource-constrained project scheduling: A survey of recent developments*. *Computers Ops Res.*, 25, 4, 279-302.
- [6] Brucker, P., Schoo, A. and Thiele, O. (1966), *A branch and bound algorithm for the resource constrained project scheduling problem*. *European Journal of O.R.*, 1998, 17, 143-158.
- [7] Kelly, J. E., Jr. *The critical path method: Resource planning and scheduling*. Ch. 21 in *Industrial Scheduling*, J.F. Muth and G.L. Thompson (eds.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 347-365.
- [8] Icmeli, O. and Rom, W. O., (1996), solving the resource-constrained project scheduling problem with optimization subroutine library. *Computers and O. R.*, 23, 801-817.
- [9] Carruthers, J. A. and Battersby, A. *Advances in critical path methods*. *Operational Research Quarterly*, 17, 359-380.
- [10] Petrovic, R. (1968), Optimisation of resource allocation in project planning. *Operations Research*, 16, 559-586.
- [11] Demeulemeester, E. and Herroelen, W. (1997), *New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem*. *Management Science*, 43, 1485-1492.
- [12] Kolisch, R., and Hartmann, S. (2006), Experimental Investigation of Heuristics for Resource-Constrained Project Scheduling: An Update. *European Journal of Operations Research*, 174, 23-37.
- [13] Coelho, J. and Tavares, L. (2003), *Comparative analysis of meta-heuristics for the resource constrained project scheduling problem*. Technical report, Department of Civil Engineering, Instituto Superior Tecnico, Portugal.
- [14] Alcaraz, J., Maroto, C. and Ruiz, R. (2004), *Improving the performance of genetic algorithms for the RCPS problem*. *Proceedings of the Ninth International Workshop on Project Management and Scheduling*, Nancy, 40-43.
- [15] Tareghian, H. R., Farahi, M. H. and Moarrab, M. (2007), *Solving Resource Constrained Scheduling Problem by Genetic Algorithm*. *Shahid Chamran Univ. Journal of Science*, 16, 24-35.



5 (1), 2020

دوره ۵، شماره ۱

بهار ۱۳۹۹

فصلنامه پژوهشی



زمان بندی پروژه با منابع محدود

- ۱ Resource-Constrained Project Scheduling Problem – RCPSP
- ۲ Work Breakdown Structure - WBS
- ۳ Finish to Start – FS
- ۴ Start to Start – SS
- ۵ Finish to Finish – FF
- ۶ Start to Finish – SF
- ۷ Lag
- ۸ Renewable Resources
- ۹ Nonrenewable Resources
- ۱۰ Mode
- ۱۱ Activity-on-node Network
- ۱۲ Priority rule-based X-pass methods
- ۱۳ Metaheuristics
- ۱۴ Ant systems
- ۱۵ Non-standard metaheuristics
- ۱۶ Scatter search
- ۱۷ Forward backward improvement – FBI
- ۱۸ Full Factorial Design

شماره قاعده	نام قاعده	چگونگی عملکرد قاعده در انتخاب فعالیت بعدی جهت تخصیص منابع
۱	SA	فعالیتی که دارای کوتاهترین زمان است
۲	LA	فعالیتی که دارای طولانی‌ترین زمان است
۳	SRD	فعالیتی که کمترین نیاز به منابع را دارد
۴	GRD	فعالیتی که بیشترین نیاز به منابع را دارد
۵	SAD	فعالیتی که دارای کمترین فعالیت‌های وابسته به آن است
۶	GAD	فعالیتی که دارای بیشترین فعالیت‌های وابسته به آن است
۷	SLFT	فعالیتی که دیرترین زمان پایان آن کوچکتر است
۸	GLFT	فعالیتی که دیرترین زمان پایان آن بزرگتر است
۹	SEST	فعالیتی که زودترین زمان شروع آن کوچکتر است
۱۰	GEST	فعالیتی که زودترین زمان شروع آن بزرگتر است
۱۱	MINSLK	فعالیتی که دارای کمترین مقدار مجموع تاخیر است