مجلهٔ پژوهش‌نامه مدیریت سال اول، شمارهٔ ۱، نیمه اول ۱۳۸۸

رویکردهای سری و موازی در زمان‌بندی پروژه با منابع محدود

حامدرضا طارقیان*
استاد دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد
مجید سالاری
کارشناس ارشدعلوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

زمان‌بندی پروژه با منابع محدود یک مسئله NP[1] است. یکی از رویکردهای ابتکاری حل این مسئله استفاده از قواعد اولویت‌بندی در برنامه‌ریزی فعالیت‌هاست. در این مقاله یازده قاعده اولویت‌بندی را به دو شیوه سری و موازی به صورت ایستا پیاده‌سازی کرده و این شیوه‌ها را با معیار تکمیل پروژه در زمان کوتاه‌تر، با یکصد و بیست مسئله آزمون استاندارد حاوی ۳۰ تا ۱۲۰ فعالیت، با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد: اولاً رویکرد موازی در به‌کارگیری قواعد اولویت‌بندی از رویکرد سری کارآمدتر است؛ ثانیاً برای بهره جستن از کارایی بیشتر رویکرد موازی، تنها کافیست حداکثر سه قاعده اولویت‌بندی دلخواه به صورت موازی به‌کار گرفته شوند.

کلید واژه‌ها : زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، رویکردهای ابتکاری حل مسئله.

---

* (نویسنده مسئول) taregian@ferdosi.ac.ir

1- Non-Polynomial

Serial and Parallel Approaches to Resource Constrained Project Scheduling Problems

Hamed. R. Tareghian
M. Salari
Faculty of Mathematical Sciences
Ferdowsi University of Mashhad

Resource constrained project scheduling (RCPS) is a NP-hard optimization problem. One approach to solve this problem is to use priority rule based methods. In this paper we implement eleven most widely used priority rules in parallel and in serial. Using 120 standard test problems each containing from 30 to 120 activities, we compared the performance of serial and parallel implementations of priority rules in solving RCPS problems yielding shorter project make spans. The results showed that the parallel implementation of priority rules gives more efficient results. Furthermore, to benefit from the parallel implementation of priority rules, it is only necessary to combine up to three arbitrary priority rules.

Keywords: Resource constrained project scheduling problem, Heuristics.

۱. مقدّمه

مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با منابع محدود[1] یک مسئله NP است و برای نخستین بار در سال ۱۹۶۳ مطرح شد (Weist 1963). این مسئله "یکی از پیچیده‌ترین مسائل تحقیق در عملیات است که در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در تدوین روش‌های حل دقیق و ابتکاری آن به‌وجود آمده و روش‌های جدید بهینه‌سازی در حل آن به کار گرفته شده اند" (Mohring et al., 2003). در این مسئله, پروژه به‌کمک روش‌هایی مانند روش شکست‌کار[2] به تعدادی فعالیت تجزیه می‌شود. این فعالیت‌ها به لحاظ رابطه‌های منطقی متفاوتی که حاکم بر آنهاست با یکدیگر ارتباط پیدا می‌کنند. رابطه‌های منطقی و بلافصل بین هر دو فعالیت به کمک یک یا چند رابطه کنترل‌کننده مانند رابطه پایان به شروع[3]، رابطه شروع به شروع[4]، رابطه پایان به پایان[5]، و رابطه شروع به پایان[6] تبیین

1. Resource-Constrained Project Scheduling Problem – RCPSP
2. Work Breakdown Structure - WBS
3. Finish to Start – FS
4. Start to Start – SS
5. Finish to Finish – FF
6. Start to Finish – SF

می‌شوند. البته در پروژه‌های پیچیده‌تر امکان تعریف رابطه‌های کنترل‌کننده بیشتری مانند توازی اجرا بین دو فعالیت[1] وجود دارد (Hajdu, 1997).

برای اجرای هر فعالیت به منابع متفاوتی از قبیل زمان، سرمایه، نیروی انسانی و ... نیاز است. این منابع غالباً به دو دسته تجدیدشدنی[2] مثل نیروی انسانی و تجدیدنشدنی[3] مانند سرمایه تقسیم می‌شوند. هر فعالیت می‌تواند در چندین حالت[4] مختلف مثلا به صورت دستی، نیمه مکانیزه و یا مکانیزه اجرا شود. اجرای هر حالت نیازمند نوع و میزان منابع متفاوتی است (Drexl et al., 1993). در مسئله برنامه‌ریزی پروژه با منابع محدود برای انجام هر فعالیت مثل i به r_{ik} واحد از منبع k، $k = ۱,\cdots,m$، 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 مسئله غالبا تعیین زمان شروع و حالت اجرای هر فعالیت به گونه‌ای است که زمان اجرای پروژه را کمینه نماید. واضح است که پاسخ این مسئله باید قیود مربوط به ارتباط منطقی فعالیت‌ها را تامین کند، و به محدودیت منابع نیز توجه داشته باشد.

۲. مدل مفهومی مسئله

مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، با توجه به شرایط متفاوت، به صورت‌های مختلف مدلسازی می‌شود. در اینجا فرض می‌کنیم پروژه به صورت یک *شبکه فعالیت ـ روی ـ گره*[5] مثل گراف $G = (V, E)$ که در آن V مجموعه گره‌ها و بیانگر فعالیت‌های پروژه و E مجموعه یال‌ها و بیانگر روابط منطقی بین فعالیت‌هاست، تعریف شده باشد. فعالیت‌ها از ۱ تا n شماره‌گذاری شده‌اند. فعالیت‌های ۱ و n مجازی هستند و شروع و پایان پروژه را نشان می‌دهند. فعالیت‌ها پس از شروع تا پایان چرخه عمر خود بدون وقفه اجرا می‌شوند. کلیه رابطه های کنترل پیش گفته در تبیین رابطه های منطقی مابین فعالیت‌های پروژه نقش دارند. در چنین شرایطی این مسئله را می‌توان به صورت زیر مدلسازی کرد:

1. Lag
2. Renewable Resources
3. Nonrenewable Resources
4. Mode
5. Activity-on-node Network

$$Min \quad t_n \qquad (۱)$$

$subject\ to:$

$$t_j - t_i \geq d_j - d_i + SS_{ij}, \quad \forall (i,j) \in R_1 \qquad (۲)$$

$$t_j - t_i \geq -d_i + SF_{ij}, \quad \forall (i,j) \in R_2 \qquad (۳)$$

$$t_j - t_i \geq d_j + FS_{ij}, \quad \forall (i,j) \in R_3 \qquad (۴)$$

$$t_j - t_i \geq FF_{ij}, \quad \forall (i,j) \in R_4 \qquad (۵)$$

$$\sum_{i \in A_t} r_{ik} \leq b_k \quad k = 1,..,m \qquad (۶)$$

$$t_i \geq 0 \quad i = 1,..,n. \qquad (۷)$$

که در آن متغیّرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

n : تعداد فعالیت‌های پروژه.

m : انواع منابع.

d_i : مدت زمان انجام فعالیت $(i = ۱\, i\, , \cdots, n)$.

t_i : زمان شروع فعالیت i.

r_{ik} : مقدارنیاز فعالیت i به منبع k.

b_k : موجودی منبع تجدیدشدنی k.

A_t : مجموعه فعالیت‌هایی که در فاصله زمانی $(t-۱, t]$ 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 $(i = ۱, \cdots, ۴)$.

با توجه به قید (۱)، هدف مسئله مدلسازی شده در ۱-۶ کمینه‌سازی 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 مسئله

مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود پیشینه‌ای بیش از ۴۰ سال دارد. برای حل این مسئله دو رویکرد بهینه و ابتکاری وجود دارد (Herroelen et al., 1998). حل مصادیق واقعی این مساله به

دلیل پیچیدگی و گستردگی با رویکردهای بهینه نظیر برنامه‌ریزی ریاضی، برنامه‌ریزی پویا و یا شاخه و کران غیر عملی است (Brucker et al., 1998). البته در ادبیات موضوع کاربرد رویکردهای بهینه در حل مصادیق کوچک‌تر این مسئله نیز گزارش شده است. به عنوان نمونه، خواننده علاقه‌مند را به (Kelly 1967; Deckro et al., 1991) در خصوص برنامه‌ریزی ریاضی، به (Icmeli et al., 1996; Carruthers et al., 1966) در خصوص روش‌های شمارشی مثل برنامه‌ریزی پویا و به (Petrovic 1968; Demeulemeester et al., 1997) در خصوص روش‌های شاخه و کران ارجاع می‌دهیم. به دلیل ناکارآمد بودن رویکردهای بهینه، اکثر مسائل واقعی زمان بندی پروژه با منابع محدود با رویکردهای ابتکاری حل می‌شوند.

بسیاری از رویکردهای ابتکاری حل مسئله برنامه‌ریزی پروژه با منابع محدود در سال ۲۰۰۶ میلادی مورد بررسی قرار گرفتند (Kolisch et al., 2006). آنها این رویکردها را در چهار گروه با عناوین (۱) رویکردهای مبتنی بر قواعد اولویت‌بندی[1] مانند روش نمونه‌گیری تصادفی (Coelho et al., 2003)؛ (۲) رویکردهای مبتنی بر روش‌های ابر ابتکاری[2] مانند الگوریتم ژنتیک (Alcaraz et al., 2004; Tareghian et al., 2007), مانند الگوریتم جستجوی ممنوع (Nonobe et al., 2002), مانند الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی (Valls et al., 2004), مانند الگوریتم مورچه[3] (Merkle et al., 2002)؛ (۳) رویکردهای مبتنی بر روش‌های ابتکاری غیر متعارف[4] مانند روش‌های مبتنی بر جستجوی محلی (Fleszar et al., 2004), مانند روش‌های تکاملی و مبتنی بر جمعیتی از جواب مثل الگوریتم جستجوی پراکنده[5] (Debels et al., 2006)؛ و بالاخره (۴) رویکردهای مبتنی بر سایر روش‌های ابتکاری مانند بهسازی پیشرو پسرو[6] (Tormos et al., 2003)، مانند روش‌های تجزیه شبکه (Sprecher, 2002) دسته‌بندی کردند. در ادامه، 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.

1. Priority rule-based X-pass methods
2. Metaheuristics
3. Ant systems
4. Non-standard metaheuristics
5. Scatter search
6. Forward backward improvement – FBI

٤. قواعد اولویت‌بندی و نحوهٔ پیاده‌سازی آنها

استفاده از قواعد اولویت‌بندی در تخصیص منابع در پروژه‌هایی که با محدودیت منابع روبرو هستند، یکی از رویکردهای ابتکاری حل مسئله 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). سؤالاتی 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 ترکیبی از آنها را مورد استفاده قرار دهیم؟ و در صورتی که استفاده ترکیبی آنها مناسب‌تر باشد چند قاعده را به صورت ترکیبی به‌کار بگیریم"؟*

در این مقاله از طریق حل مسائل آزمون ابتدا 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 به‌کار می‌گیریم. برای تعیین ترکیب مناسبی از این قواعد به این صورت 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 را که توسط *باکتر* مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به‌کار می‌گیریم (Boctor 1990). یادآوری می‌کنیم که در تولید هر مجموعه، پارامترهای مسائل به کمک طرح آزمون فاکتوریل[1] مقداردهی شده‌اند (Kolisch et al., 1995). این مسائل برای ارزیابی رویکردهای ابتکاری حل این مسئله، توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند و از کتابخانه زمان‌بندی پروژه قابل پیاده‌سازی

1. Full Factorial Design

هستند (Kolisch et al., 1996).

۵. بحث و بررسی نتایج

برای 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 مسئله آزمون) از مسائل آزمون را به‌کار 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 هریک 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.

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

قاعده	رتبه ۱		رتبه‌های ۱ - ۲		رتبه‌های ۱ - ۳		رتبه‌های ۱ - ۴		رتبه‌های ۱ - ۵	
	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)
۱	۲	۰.۰۶۷	۲	۰.۰۶۷	۶	۰.۲۰۰	۷	۰.۲۳۳	۱۳	۰.۴۳۳
۲	۸	۰.۲۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۶	۰.۵۳۳	۱۹	۰.۶۳۳	۲۱	۰.۷۰۰
۳	۵	۰.۱۶۷	۸	۰.۲۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۲۱	۰.۷۰۰	۲۳	۰.۷۶۷
۴	۱	۰.۰۳۳	۵	۰.۱۶۷	۱۲	۰.۴۰۰	۱۳	۰.۴۳۳	۱۷	۰.۵۶۷
۵	۷	۰.۱۶۷	۱۰	۰.۳۳۳	۱۴	۰.۴۶۷	۱۷	۰.۵۶۷	۲۱	۰.۷۰۰
۶	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۸	۰.۲۶۷	۱۴	۰.۴۶۷	۲۳	۰.۷۶۷
۷	۵	۰.۱۶۷	۱۵	۰.۵۰۰	۱۸	۰.۳۰۰	۲۰	۰.۶۶۷	۲۳	۰.۷۶۷
۸	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۸	۰.۲۶۷	۱۰	۰.۳۳۳	۱۴	۰.۴۶۷
۹	۲	۰.۰۶۷	۸	۰.۲۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۵	۰.۵۰۰	۱۶	۰.۵۳۳
۱۰	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۱	۰.۳۶۷	۱۸	۰.۶۰۰
۱۱	۹	۰.۳۰۰	۱۷	۰.۵۶۷	۲۳	۰.۷۶۷	۲۷	۰.۹۰۰	۳۰	۱.۰۰۰

در جدول ۱ ملاحظه می‌کنیم که جواب‌های حاصل از به‌کارگیری مثلا قواعد اولویت‌بندی ۳، ۶ و۷ با احتمالی بیش از ۷۶٪ در بین ۵ جواب بهتر قرار گرفته‌اند. این در حالی است که جواب‌های

حاصل از به‌کارگیری قاعده اولویت‌بندی ۱ تنها با احتمالی قریب به ۴۳٪ در بین ۵ جواب بهتر می‌باشد.

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

قاعده	رتبه ۱		رتبه‌های ۱ - ۲		رتبه‌های ۱ - ۳		رتبه‌های ۱ - ۴		رتبه‌های ۱ – ۵	
	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)
۱	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۱	۰.۳۶۷	۱۶	۰.۵۳۳
۲	۹	۰.۳۰۰	۱۲	۰.۴۰۰	۱۸	۰.۶۰۰	۲۲	۰.۷۳۳	۲۵	۰.۸۳۳
۳	۲	۰.۰۶۷	۵	۰.۱۶۷	۱۰	۰.۳۳۳	۱۲	۰.۴۰۰	۱۲	۰.۴۰۰
۴	۱	۰.۰۳۳	۴	۰.۱۳۳	۵	۰.۱۶۷	۸	۰.۲۶۷	۹	۰.۳۰۰
۵	۲	۰.۰۶۷	۳	۰.۱۰۰	۵	۰.۱۶۷	۹	۰.۳۰۰	۱۳	۰.۴۳۳
۶	۳	۰.۱۰۰	۸	۰.۲۶۷	۱۳	۰.۴۳۳	۱۵	۰.۵۰۰	۱۹	۰.۶۳۳
۷	۷	۰.۲۳۳	۱۱	۰.۳۶۷	۱۵	۰.۵۰۰	۱۶	۰.۵۳۳	۲۲	۰.۷۳۳
۸	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۸	۰.۲۶۷
۹	۳	۰.۱۰۰	۵	۰.۱۶۷	۷	۰.۲۳۳	۱۲	۰.۴۰۰	۱۵	۰.۵۰۰
۱۰	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷	۷	۰.۲۳۳	۱۰	۰.۳۳۳	۱۱	۰.۳۶۷
۱۱	۵	۰.۱۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۳	۰.۴۳۳	۱۸	۰.۶۰۰	۲۳	۰.۷۶۷

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

قاعده	رتبه ۱		رتبه‌های ۱ - ۲		رتبه‌های ۱ - ۳		رتبه‌های ۱ - ۴		رتبه‌های ۱ – ۵	
	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)
۱	۳	۰.۱۰۰	۶	۰.۲۰۰	۹	۰.۳۰۰	۱۲	۰.۴۰۰	۱۹	۰.۶۳۳
۲	۳	۰.۱۰۰	۶	۰.۲۰۰	۱۴	۰.۴۶۷	۱۹	۰.۶۳۳	۲۵	۰.۸۳۳
۳	۲	۰.۰۶۷	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۰	۰.۳۳۳	۱۱	۰.۳۶۷
۴	۱	۰.۰۳۳	۵	۰.۱۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۳	۰.۴۳۳	۱۸	۰.۶۰۰
۵	۰	۰.۰۰۰	۲	۰.۰۶۷	۳	۰.۱۰۰	۴	۰.۱۳۳	۹	۰.۳۰۰
۶	۲	۰.۰۶۷	۵	۰.۱۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۴	۰.۴۶۷	۱۸	۰.۶۰۰
۷	۱۰	۰.۳۳۳	۱۳	۰.۴۳۳	۲۰	۰.۶۶۷	۲۵	۰.۸۳۳	۲۷	۰.۹۰۰
۸	۲	۰.۰۶۷	۲	۰.۰۶۷	۲	۰.۰۶۷	۲	۰.۰۶۷	۴	۰.۱۳۳
۹	۰	۰.۰۰۰	۴	۰.۱۳۳	۱۱	۰.۳۶۷	۱۴	۰.۴۶۷	۱۷	۰.۵۶۷
۱۰	۲	۰.۰۶۷	۴	۰.۱۳۳	۴	۰.۱۳۳	۸	۰.۲۶۷	۱۳	۰.۴۳۳
۱۱	۵	۰.۱۶۷	۱۰	۰.۳۳۳	۱۶	۰.۵۳۳	۲۰	۰.۶۶۷	۲۳	۰.۷۶۷

جدول ۱ نشان می‌دهد که در مسائل با تعداد فعالیت کمتر (۳۰ فعالیتی)، جواب‌های حاصل از به‌کارگیری قاعده اولویت‌بندی ۱۱، به یقین در بین ۵ جواب برتر قرار دارد. این در حالی است که در مسائل با فعالیت بیشتر (جداول ۲، ۳ و ۴)، جواب‌های حاصل از به‌کارگیری قاعده اولویت‌بندی ۱۱ تنها با احتمال ۷۶٪ در بین ۵ جواب بهتر قرار می‌گیرد.

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

قاعده	رتبه ۱		رتبه‌های ۱ - ۲		رتبه‌های ۱ - ۳		رتبه‌های ۱ - ۴		رتبه‌های ۱ - ۵	
	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)	تعداد	(p)
۱	۰	۰.۰۰۰	۵	۰.۱۶۷	۸	۰.۲۶۷	۱۱	۰.۳۶۷	۱۴	۰.۴۶۷
۲	۵	۰.۱۶۷	۱۲	۰.۴۰۰	۱۳	۰.۴۳۳	۱۶	۰.۵۳۳	۱۹	۰.۶۳۳
۳	۳	۰.۱۰۰	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۷	۰.۲۳۳	۱۱	۰.۳۶۷
۴	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۰	۰.۳۳۳	۱۷	۰.۵۶۷	۲۱	۰.۷۰۰
۵	۰	۰.۰۰۰	۰	۰.۰۰۰	۱	۰.۰۳۳	۵	۰.۱۶۷	۷	۰.۲۳۳
۶	۴	۰.۱۳۳	۶	۰.۲۰۰	۱۳	۰.۴۳۳	۱۹	۰.۶۳۳	۲۲	۰.۷۳۳
۷	۹	۰.۳۰۰	۱۶	۰.۵۳۳	۲۲	۰.۷۳۳	۲۴	۰.۸۰۰	۲۸	۰.۹۳۳
۸	۰	۰.۰۰۰	۰	۰.۰۰۰	۱	۰.۰۳۳	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷
۹	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷	۷	۰.۲۳۳	۱۱	۰.۳۶۷	۱۴	۰.۴۶۷
۱۰	۰	۰.۰۰۰	۱	۰.۰۳۳	۱	۰.۰۳۳	۲	۰.۰۶۷	۳	۰.۱۰۰
۱۱	۶	۰.۲۰۰	۱۴	۰.۴۶۷	۱۷	۰.۵۶۷	۱۹	۰.۶۳۳	۲۳	۰.۷۶۷

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 به‌کارگیری 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 پرانتز قرار داده شده‌اند). 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 گرفته‌اند).

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>

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 و۴تایی استفاده کرده‌ایم. نتایج حاصل در جدول ۶ آورده شده است. این جدول نشان می دهد 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 ۶ : تعدادمسائلی‌که دراستفاده موازی قواعد، جوابشان‌ازبهترین‌جواب‌سری بهتر بوده واحتمال 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،۶،۷،۱۱
۳۰ تایی	۱۹	۲۰	۲۰	۱۵	۱۲	۱۴	۱۸	۲۰	۱۴	۲۱	۲۰
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

با توجه به سطر آخر جدول ۶ می‌بینیم که با به‌کارگیری موازی قواعد اولویت‌بندی, با احتمال دست‌کم ۵۵.۸٪ جواب بهتری نسبت به حالتی که این قواعد به صورت سری پیاده‌سازی شده‌اند،

حاصل می‌شود.

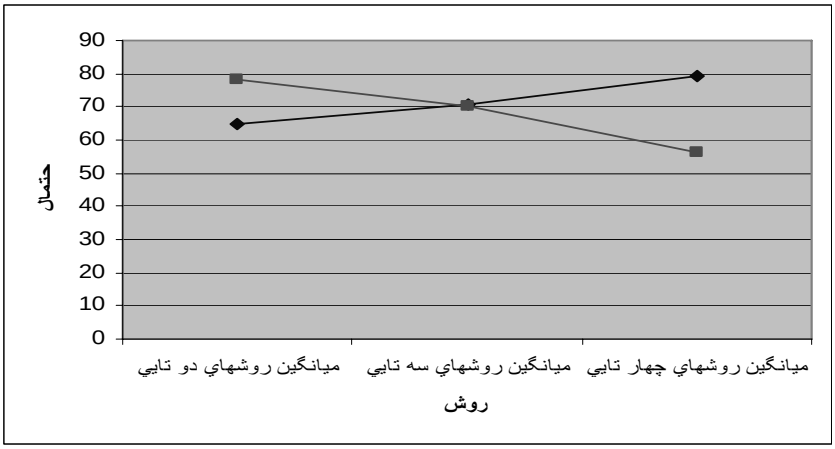
سوالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که آیا کیفیت بهتر جواب‌ها در رویکرد موازی تنها متاثر از به‌کارگیری ترکیبی قواعد اولویت‌بندی است؟ برای پاسخگویی به این سوال قواعد اولویت‌بندی ۵، ۸، ۹ و ۱۰ را که از نظر کیفیت حل مسئله همواره در ۵ رتبه آخر قرار داشته‌اند به صورت ترکیبی به‌کار می‌گیریم تا ببینیم آیا به‌کارگیری موازی آنها می‌تواند در کیفیت عملکردشان در حل مسائل تاثیرگذار باشد؟ جدول ۷ نتایج حاصل از به‌کارگیری ترکیبی این قواعد را نشان می‌دهد.

باتوجه به سطر آخر جدول ۷ ملاحظه می شود که وقتی همین قواعد اولویت‌بندی به صورت موازی به‌کار 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 به‌کارگرفته 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 را 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	۵،۸،۹،۱۰
۳۰ تایی	۲۷	۲۸	۲۸	۲۴	۲۴	۲۴	۲۶	۲۲	۲۵	۲۱	۲۰
احتمال	۰.۹۰	۰.۹۳	۰.۹۳	۰.۸۰	۰.۸۰	۰.۸۰	۰.۸۷	۰.۷۳	۰.۸۳	۰.۷۰	۰.۶۷
۶۰ تایی	۲۵	۲۶	۲۴	۲۸	۲۴	۲۷	۲۳	۲۳	۲۴	۲۳	۱۹
احتمال	۰.۸۳	۰.۸۷	۰.۸۰	۰.۹۳	۰.۸۰	۰.۹۰	۰.۷۷	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۷۷	۰.۶۳
۹۰ تایی	۲۳	۲۶	۲۷	۲۵	۲۹	۲۹	۲۰	۲۴	۲۷	۲۲	۱۷
احتمال	۰.۷۷	۰.۸۷	۰.۹۰	۰.۸۳	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۶۷	۰.۸۰	۰.۹۰	۰.۷۳	۰.۵۷
۱۲۰ تایی	۲۲	۲۲	۲۳	۲۶	۲۶	۲۶	۲۳	۲۱	۲۵	۲۷	۲۳
احتمال	۰.۷۳	۰.۷۳	۰.۷۷	۰.۸۷	۰.۸۷	۰.۸۷	۰.۷۷	۰.۷۰	۰.۸۳	۰.۹۰	۰.۷۷
۱۲۰ – ۳۰	۹۷	۱۰۲	۱۰۲	۱۰۳	۱۰۳	۱۰۶	۹۲	۹۰	۱۰۱	۹۳	۷۹
احتمال	۰.۷۵	۰.۸۰	۰.۷۹	۰.۷۷	۰.۷۷	۰.۸۰	۰.۶۹	۰.۶۹	۰.۷۶	۰.۶۶	۰.۵۶

همان طور که ملاحظه می‌شود بدون توجه به کیفیت عملکرد مستقل هر قاعده، ترکیب حداکثر سه قاعده اولویت‌بندی با احتمال حدود ۷۰ درصد جواب بهتری نسبت به پیاده‌سازی مستقل و سری همان قواعد به‌دست می‌دهد. سؤالی که در حال حاضر محققین مشغول بررسی آن هستند، پیداکردن حداکثر تعداد قواعدی است که به‌کارگیری ترکیبی آنها، منجر به کسب بهترین جواب ممکن می‌گردد.



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

٦. نتیجه

در این مقاله دو رویکرد سری و موازی در به‌کارگیری قواعد اولویت‌بندی برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود را با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد: اولاً رویکرد موازی در به‌کارگیری قواعد اولویت‌بندی نسبت به رویکرد سری از کارایی بیشتری برخوردار است: ثانیاً برای بهره جستن از کارایی بیشتر رویکرد موازی تنها کافیست حداکثر سه قاعده اولویت‌بندی دلخواه به صورت موازی به‌کار گرفته شوند.

نتایج حاصل از این کار تحقیقاتی می‌تواند در برنامه‌ریزی پروژه‌های عمرانی ملی و استانی در ایران به ویژه در موقعیت‌هایی که منابع مورد نیاز این پروژه‌ها دارای محدودیت هستند به‌کار گرفته شوند. در ایران، طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۳ متوسط تعداد طرحهای عمرانی ملی و استانی در دست اجرا به‌ترتیب 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، به‌ترتیب ۶۱.۶ و ۲۹.۸ درصد از پروژه‌های عمرانی ملی و استانی در سال‌های مختلف برنامه نسبت به برنامه زمانی تعیین شده، تاخیر داشته‌اند. تأخیر در زمان اتمام پروژه‌ها سبب طولانی شدن مدت اجرای آنها شده (میانگین وزنی مدت اجرای پروژه‌های عمرانی ملی و استانی خاتمه یافته طی سال‌های ۸۳-۷۹ به ترتیب به ۹.۵ و ۳.۲ سال رسیده است) و خسارات عمده‌ای به اقتصاد کشور وارد می‌کند. بدیهی است چنانچه به‌کارگیری اثربخش نتایج این مقاله بتواند تنها ۱٪ از زمان به تاخیر افتادن پروژه‌ها را بکاهد، مقدار قابل توجهی در هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی این پروژه‌ها صرفه جویی خواهد کرد.

References

1. 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.
2. Boctor, F. (1990), **Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling**. *European Journal of O.R.*, 49, 3-13.
3. Brucker, P., Schoo, A. and Thiele, O. (1998), **A branch and bound algorithm for the resource constrained project scheduling problem**. *European Journal of O.R.*, 17, 143-158.
4. Carruthers, J. A. and Battersby, A. **Advances in critical path methods**. Operational Research Quarterly, 17, 359-380.
5. 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.
6. 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.
7. Deckro, R. F., Winkofsky, E. P., Hebert, J. E. and Gagnon, R., (1991), **A decomposition approach to multi-project scheduling**. *European Journal of O.R.*, 51, 110-118.
8. Demeulemeester, E. and Herroelen, W. (1997), **New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem**. *Management Science*, 43, 1485-1492.
9. Drexl, A. and Grunewald, J. (1993), **Nonpreemptive multi-mode resource constrained project scheduling**. IIE Trans., 25, 74-81.

10. 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.

11. Hajdu, M. (1997), **Network Scheduling Techniques for Construction Project Management**. Kluwer Academic Publishers.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Kolisch, R. and Sprecher. A. (1996), **PSPLIB – A project scheduling problem library**. *European Journal of O.R.*, 96, 205-216.

17. Kolisch, R., Sprecher, A. and Drexl, A. (1995), **Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problem**. Mngmt Sci., 41, 10, 1693-1703.

18. Merkle, D., Middendorf, M. and Schmeck. H. (2002), **Ant colony optimization for resourceconstrained project scheduling**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6, 333–346.

19. Mohring, R., Schulz, A., Stork, F., and Uetz, M. (2003), **Solving project scheduling problems by minimum cut computations.** Management Science, 49, 3, 330-350.

20. Nonobe, K. and Ibaraki, T. (2002), *F***ormulation 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.

21. Petrovic, R. (1968), **Optimisation of resource allocation in project planning**. Operations Research, 16, 559-586.

22. Sprecher, A. (2002), **Network decomposition techniques for resource-constrained project scheduling**. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 4, 405–414.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. Wiest, J. D. (1963), **The scheduling of large projects with limited resources**. Ph.D.

«پیوست»

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.