ارائهٔ یک الگوریتم ابتکاری توسعه یافته برای تسطیح منابع نامحدود در یک پروژه

سید محمد تقی فاطمی قمی
استاد
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

نیوشا کاشانی
دانشجوی کارشناسی ارشد
مرکز تحقیقات و نوآوری صنایع خودرو سایپا

چکیده

تسطیح منابع نامحدود یکی از تکنیک‌های مهمّ مورد استفاده در زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه‌ها است. برای تسطیح منابع نامحدود، چندین روش بهینه‌سازی قطعی و ابتکاری ارائه شده است که به دلیل عدم کارایی روش های بهینه‌سازی قطعی، الگوریتم‌های ابتکاری حداقل گشتاور و الگوریتم هیاست در عمل بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مشکلات الگوریتم های حداقل گشتاور و هیاست ، عدم بررسی اثر قدم های توالی بر یکدیگر در هنگام جابه جایی فعالیت ها، عدم استفاده از قانون مناسب برای اولویت‌بندی فعالیت‌هاست. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، سعی در برطرف کردن این مشکلات دارد. کارایی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های موجود ، استفاده از مجموعهٔ پروژه‌های ایجاد شده با نرم‌افزار معروف ایجاد کنندهٔ شبکه‌های تصادفی پروژه (PROGEN) ، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

روش مسیر بحرانی، زمان‌بندی پروژه، تسطیح منابع نامحدود، ضریب بهبود منابع

A Modified Heuristic Algorithm for Unconstrained Resource Leveling

S.M.T Fatemi Ghomi
Professor

N. Kashani
Master of Science Degree

Department of Industrial Engineering,
Amirkabir University of Technology

Abstract

Resource Leveling is one of the most important techniques for scheduling the activities of projects. There are several exact optimization and heuristics algorithms for unconstrained resource leveling and because of weak performance and limitations of exact optimization methods, heuristics algorithms like minimum of moment and hyasat algorithm are the most practical approaches for leveling. These approaches are careless about interaction between sequence steps and do not use justified priority rule in choosing activities for leveling. Proposed algorithm try to solve these known issues. The performance of proposed algorithm against current algorithms has been studied by random project networks which are generated by so called random project generator (PROGEN).

Keywords

Critical Path Method, Project Scheduling, Unconstrained Resource Leveling, Resource Improvement Coefficient

مقدمه

امروزه تلاش در جهت هماهنگی با نیازهای بازار و ارائهٔ محصولات رقابتی، موجب گسترش و بسط مدل ها و تکنیک‌های بهینه‌سازی شده است. دیگر نمی‌توان از مدل‌های ساده و محدود در مدیریّت پروژه، برنامه‌ریزی تولید و توالی عملیّات، شود جست و انتظار اخذ نتایج مناسب را در بازارهای امروزی داشت. در سال های اخیر مدل‌های تخصیص و تسطیح منابع مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. این توجه، نه تنها به دلیل اهمیّت نظری این مساله، بلکه ناشی از کاربردهای عملی زیاد بوضوح در صنایع گوناگون و بویژه فعّالیت‌های دارای ارزشِ مالی زیاد، با محدودیت‌های زمانی بوده است.

الف ـ تعاریف

در کتاب دانش مدیریت پروژه[1] [۱۲]، زمان‌بندی[2] یک پروژه این گونه تعریف شده است:

«زمان بندی، تعیین تاریخ های برنامه‌ریزی شده برای انجام فعالیتها برای تحقق وقایع کلیدی[3] مدنظر است.»

تسطیح منابع یکی از ابزارهای مهم در فرآیند زمان بندی پروژه‌ها است. خروجی روش‌هایی مثل مسیر بحرانی، با استفاده از تکنیک‌های تخصیص و تسطیح منابع، یک برنامه زمان بندی کاملتر و واقعی خواهد بود. تسطیح منابع را این گونه تعریف کرده‌اند: [۱۲]

«تسطیح منابع، نوعی تحلیل شبکه است که در آن تصمیم‌های مربوط به زمان‌بندی (تعیین تاریخ شروع و پایان فعالیت‌ها) با توجّه به محدودیت‌های مدیریّت منابع (تغییرات در سطوح منابع مورد نیاز و مشکلات ناشی از آن و نیز وجود منابع محدود) اتخاذ می‌شود.»

تسطیح منابع نامحدود یکی از تکنیک‌های تسطیح منابع است که سعی در حدّاقل کردن تغییرات در سطوح منابع مورد نیاز و مشکلات ناشی از آن در حدّاقل زمان ممکن برای اجرای پروژه (خروجی روش مسیر بحرانی[4]) دارد. اما چرا تغییرات در سطح منابع مورد نیاز در طول پروژه نامناسب است؟

۱ـ تغییرات زیاد در سطح منابعی مانند نیروی انسانی، ایجاد مشکلات و هزینه‌های استخدام و اخراج افراد، هزینه و زمان مورد نیاز برای آموزش افراد جدید و مشکلات مربوط به کارایی افراد در دراز مدت را در پی دارد و باعث می‌شود به دلیل ایجاد سابقهٔ بد برای سازمان، از استخدام و به کارگیری افراد کارآمد جلوگیری شود. همچنین با هموار بودن سطح نیاز به منابع، هزینهٔ اجاره و حمل و نقل تجهیزات سنگین و گران قیمت کاهش می‌یابد.

۲ـ با زیاد بودن تغییرات سطح منابع ممکن است به دلیل وجود مقاطع زمانی که نیاز به منابع زیادی دارند، کارایی استفاده از منابع کاهش و هزینه‌ها افزایش یابند.

۳ـ برای منابعی مانند ماشین آلات وجود یک سطح ثابت و هموار برای نیاز به منابع، می‌تواند در تبیین برنامه‌های تهیه، اجاره، حمل و نقل و حتی نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات و تجهیزات کمک شایانی نماید.

ب ـ بررسی ادبیات موضوع

کارهای صورت گرفته در زمینه تسطیح منابع نامحدود را می‌توان به دو گروه روش های بهینه‌سازی قطعی و الگوریتم‌های ابتکاری تقسیم کرد:

ج ـ روش‌های بهینه سازی قطعی

در سال ۱۹۷۶، آهوجا[۱] روشی را بر اساس شمارش صریح[5] حالت‌های ممکن پیشنهاد کرد که تغییرات روز به روز نیاز به منابع را با توجه به شناوری‌های موجود برای فعالیت‌ها بررسی و حالت بهینه را انتخاب می‌کرد. در سال ۱۹۹۶، یونس و ساد [۱۴] روشی مبتنی بر شمارش صریح ارائه دادند که برای تسطیح یک یا چند منبع کاربرد داشت. عمده‌ترین مزیّت کار آنها در ارائهٔ شکل ساده و ماتریسی برای تسطیح منابع بود. کاملترین مدل برنامه‌ریزی صفر و یک، توسط عیسی [۳] (۱۹۸۹) ارائه شد. عدم کارایی روش های بهینه‌سازی قطعی، خصوصاً در پروژه‌های با تعداد فعالیتهای زیاد، باعث شد که عمدهٔ فعالیت محققان به سمت بررسی و ارائهٔ الگوریتم های ابتکاری سوق پیدا کند. به عنوان مثال در یک پروژه با ۶ فعالیت غیر بحرانی که هر کدام

تنها ۱۰ واحد زمانی شناوری دارند، بررسی ۶۰ میلیون حالت مختلف (در شمارش صریح) لازم است. در منبع [۱۳]،NP-Complete بودن مساله تسطیح منابع نامحدود نشان داده شده است.

د- روشهای ابتکاری

یکی از اولین روش های ابتکاری ارائه شده برای تسطیح منابع نامحدود در سال ۱۹۶۲ توسط برگس و کیلبرو[۴] معرفی شد. این روش که در ایران به روش برگس معروف است در اکثر کتاب های درسی مدیریت پروژه معرفی شده است. ایراد عمدهٔ این روش، تکیه بر نمایش برداری فعالیتهای شبکه است.[۶] تکمیل شدهٔ این روش با عنوان روش حداقل گشتاور در سال ۱۹۷۸ توسط هریس[۴] ارائه شد. روش حداقل گشتاور تا مدت ها مطرحترین روش در زمینه تسطیح منابع بود. بعدها هریس در سال ۱۹۹۰ [۵]، الگوریتم جدیدی با نام پک[۷] ارائه کرد که به دلیل مشکلات پیاده‌سازی، چندان مورد توجه قرار نگرفت. البته جواب های این روش تا حدودی زیاد به روش حداقل گشتاور شبیه بود. در سال ۱۹۹۶، ساوین[۱۳]، از شبکه‌های عصبی در مدلسازی تسطیح منابع سود برد. در سال ۱۹۹۶ چان، چوا و کانان از روش الگوریتم ژنتیک برای تسطیح منابع استفاده کردند [۲ در روش پیشنهادی ایشان نمایش ژنها بر اساس اولویت زمان بندی و میزان استفاده از شناوری جمعی توسط فعالیتها شکل گرفته است. همچنین آقایان لئو، یانگ و هوانگ در سال ۲۰۰۰ از رویکرد الگوریتم ژنتیک برای ایجاد یک سیستم پشتیبانی تصمیم[۸] برای تسطیح منابع [۱۰] استفاده کردند که بر پایهٔ روش حداقل گشتاور قرار داشت اما از روش نمایش و عملگرهای ژنتیک مناسبی سود نمی‌برد.

یکی از عمده‌ترین بهبودها در زمینه الگوریتم های ابتکاری در سال ۲۰۰۰ توسط هیاست ارائه شد. [۶] که باعث شد با افت اندکی در کیفیّت جوابهای حاصل، زمان حل به صورت چشمگیری کاهش یابد. در سال ۲۰۰۱ نیز مقاله دیگری در مورد تسطیح چند منبع با الگوریتم جدید توسط هیاست [۷] ارائه شد.

۱- مروری بر عملکرد الگوریتم های موجود برای تسطیح منابع نامحدود

همان گونه که در بخش ۱-۲-۲ اشاره شد، روش حداقل گشتاور و الگوریتم هیاست از کاربردی ترین الگوریتم های تسطیح منابع نامحدود هستند. الگوریتم تسطیح منابع نرم‌افزارهای مطرح در زمینه مدیریت و زمان‌بندی پروژه مانند پریماورا و مایکروسافت پروژه نیز عملکردی شبیه این الگوریتمها دارند .[۸] هر چند که نرم‌افزار پریماورا امکان انتخاب قانون اولویت مورد استفاده را نیز به کاربر می‌دهد.

۱-۱- محاسبات اصلی

برای استفاده از این الگوریتم ها، ابتدا باید قدم های توالی[۹] تعیین شوند. چنانچه زمان اجرای[۱۰] هر یک از فعالیتها را یک در نظر بگیریم و سپس الگوریتم مسیر بحرانی را اجرا کنیم، زودترین زمان آغاز اختصاص یافته به هر فعالیت، معرف قدم توالی آن است. نکتهٔ بسیار مهم در اینجا این است که هیچ‌یک از فعالیتهایی که پیش نیاز یا پس نیاز هم باشند دارای یک قدم توالی نخواهند بود. بنابراین همهٔ فعالیتهایی که دارای یک قدم توالی هستند می‌توانند بصورت موازی با یکدیگر برنامه‌ریزی شوند.

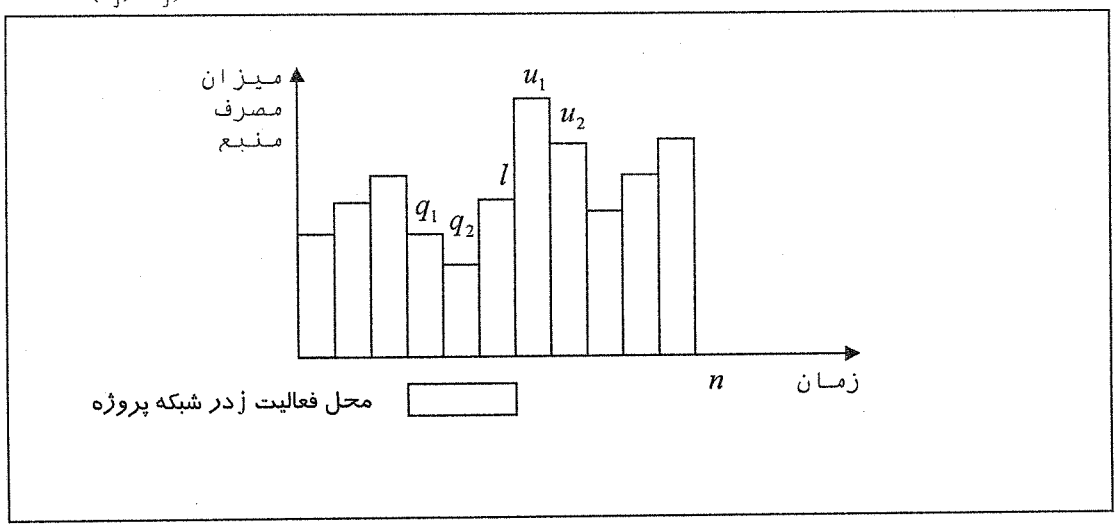
یکی از موارد مهم درباره الگوریتمهای تسطیح منابع نامحدود، محاسبه فاکتور بهبود[۱۱] است. میزان بهبود ایجاد شده در هیستوگرام منابع را که در اثر جابجایی یک فعالیت مشخص به میزانی معلوم (که حداکثر برابر با شناوری آزاد[۱۲] آن فعالیت است.) ایجاد می‌شود را فاکتور بهبود می‌نامند. [۱۱]

فاکتور بهبود را به ازای همهٔ جابجایی هایی ممکن برای یک فعالیت می‌توان محاسبه نمود. هر قدر میزان آن بیشتر باشد، میزان بهبود حاصل از جابجایی فعالیت بیشتر می‌شود و چنانچه مقدار فاکتور بهبود منفی باشد، جابجایی فعالیت باعث بدتر شدن هیستوگرام نیاز به منابع (از لحاظ تسطیح) خواهد شد. مقدار فاکتور بهبود برای فعالیتها با توجه به شکلهای ۱ و۲ و با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

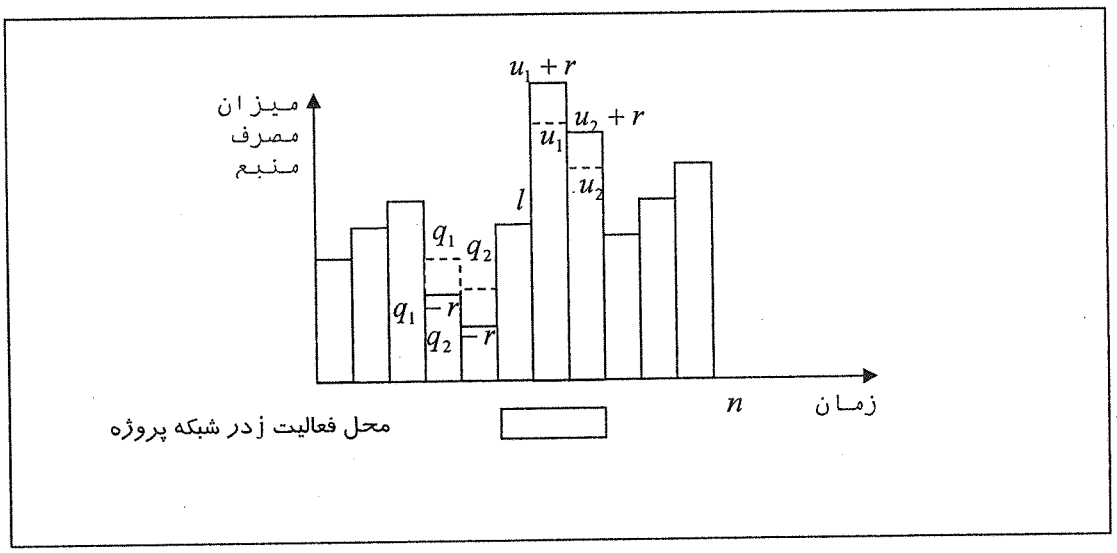
m: میزان جابجایی مدنظر برای فعالیت j

$$IF(j,dis_j) = rate_j[\sum_{i=1}^{m} q_i - \sum_{i=1}^{m} U_i - m.rate_j] \quad 0<m<FF_j \text{ (برای جلوگیری از تداخل میان فعالیتهای مختلف)} \qquad (۱)$$

$$m = Min(d_j, dis_j)$$



شکل (۱) هیستوگرام منابع پیش از جابجایی فعالیت j.



شکل (۲) هیستوگرام منابع پس از جابجایی فعالیت j.

برای سنجش میزان تسطیح منابع از ضریبی با عنوان ضریب بهبود منابع[۱۳] استفاده می‌شود.

$$RIC = \frac{n\sum_{i=1}^{n} y_i^2}{(\sum_{i=1}^{n} y_i)^2} \text{ (ضریب بهبود منابع)} \qquad (۲)$$

اولاً: می‌دانیم که مقادیر n و $A = \sum_{i=1}^{n} y_i$ در یک پروژه، ثابت هستند، بنابراین ضریب بهبود منابع، ضریبی از $\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} y_i^2$ یا گشتاور هیستوگرام منابع حول محور X است.

ثانیاً: مقدار ضریب بهبود منابع برای پروژه‌ای که کاملا تسطیح شده است، یک است.

زیرا می‌دانیم: (مقدار بهینه برای y_i ها) $y_i^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}$ پس در حالتی که پروژه کاملا تسطیح شده است، خواهیم داشت:

$$\Rightarrow \quad y_i^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{A}{n} \qquad RIC = \frac{n\sum_{i=1}^{n} y_i^2}{(\sum_{i=1}^{n} y_i)^2} = \frac{\frac{n^2.A^2}{n^2}}{\frac{A^2}{A^2}} = \frac{\frac{n^2.A^2}{n^2}}{\frac{A^2}{A^2}} = 1$$

۱-۲ـ گردش کار الگوریتم حداقل گشتاور

در این الگوریتم، ابتدا قدم های توالی هر فعالیت تعیین و کلیه فعالیت ها در زودترین زمان شروع ممکن زمان‌بندی می‌شوند. برای جابجایی فعالیت ها و بهبود تسطیح منابع به شرح ذیل عمل می‌شود:

۱ـ قدم رفت: ابتدا از آخرین قدم توالی آغاز می‌کنیم. برای همهٔ فعالیت های آخرین قدم توالی مقدار فاکتور بهبود به ازای کلیه محلهای ممکن برای جابجایی روبه جلو محاسبه می شود (با استفاده از رابطه ۱) و سپس بهترین فاکتور بهبود انتخاب و فعالیت مورد نظر جا به جا می‌شود. مجدداً فاکتورهای بهبود برای سایر فعالیت ها تعیین و فعالیت بعد انتخاب می‌شود. این عمل تا جا به جایی همهٔ فعالیت ها با فاکتور بهبود مثبت، تکرار می‌شود و این کار تا رسیدن به اولین قدم توالی ادامه می‌یابد.

۲ـ قدم برگشت: از قدم توالی اول شروع و همهٔ محاسبات فوق برای جا به جایی روبه عقب فعالیت ها تکرار می‌شود.

۱-۳ـ گردش کار الگوریتم هیاست

گردش کار این الگوریتم دقیقاً مشابه الگوریتم حداقل گشتاور است با این تفاوت که به جای انتخاب فعالیت ها در هر قدم توالی بر اساس میزان فاکتور بهبود (و در نتیجه محاسبات مجدّد) از یک قانون اولویّت؛ یعنی حاصلضرب $FFj * rate_j$ استفاده می‌شود. فعالیتی که دارای بیشترین مقدار برای این حاصلضرب باشد، در قدم توالی مربوط زودتر جا به جا خواهد شد. (میزان جابه جایی انتخابی برای فعالیت، بر اساس بیشترین فاکتور بهبود است.) مزیّت اصلی این الگوریتم سرعت آن نسبت به الگوریتم حداقل گشتاور است، هر چند که این الگوریتم از لحاظ عملکرد از الگوریتم حداقل گشتاور ضعیفتر است.

۱-٤ـ فرضهای اصلی الگوریتم های تسطیح منابع نامحدود

همهٔ فرضهای زیر برای الگوریتمهای موجود و نیز الگوریتم پیشنهادی صادق است:

۱ـ زمان فعالیت ها قطعی است.

۲ـ فعالیتها پس از شروع تا زمان پایان قطع نمی‌شوند.

۳ـ میزان منبع مورد نیاز برای یک فعالیت در طول زمان اجرای آن ثابت است.

۴ـ منطق شبکه (روابط پیشنیازی) قطعی است و تنها شامل رابطه پایان به آغاز بین فعالیت هاست.

۵ـ زمان انتهای پروژه (حاصل از روش مسیر بحرانی) ثابت و غیر قابل تغییر است.

۶ـ کلیه الگوریتم ها برای تسطیح یک منبع استفاده می‌شوند. (با تکرار این الگوریتم ها برای هر منبع، از همین الگوریتم ها می‌توان برای تسطیح چند منبع نیز استفاده کرد.)

۲ـ ساختار الگوریتم پیشنهادی

۲-۱ـ تغییر قانون اولویّت مورد استفاده

الگوریتم هیاست برای قانون اولویّت از حاصلضرب $FFj * rate_j$ استفاده می‌کند. در این مقاله این قانون اولویت، مورد آزمون قرار گرفته است. برای این منظور ۱۰ قانون اولویت در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

با بررسی همهٔ قوانین اولویت فوق با استفاده از ۹۰ شبکه پروژهٔ تصادفی (رجوع کنید به بخش۴) مشاهده شده است که

قانون اولویت شماره ۱۰ بصورت متوسط از سایر قوانین عملکرد بهتری در تسطیح منابع با استفاده از معیار ضریب بهبود منابع نشان می‌دهد. (متوسط ۶ درصد از قانون شماره ۸ که توسط هیاست پیشنهاد شده، بهتر بوده است.) از قانون اولویت شماره ۱۰، یعنی TFj*Ratej در الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است.

جدول (۱) قوانین اولویت امتحان شده جهت تسطیح منابع نامحدود.

ردیف	عنوان	رابطه	چگونگی مرتب‌سازی[۱۴]
۱	زمان فعالیتها	Dj	صعودی
۲	زمان فعالیتها	Dj	نزولی
۳	میزان مصرف منابع	Ratej	صعودی
۴	میزان مصرف منابع	Ratej	نزولی
۵	میزان مصرف منابع × زمان فعالیتها	Dj*Ratej	صعودی
۶	میزان مصرف منابع × زمان فعالیتها	Dj*Ratej	نزولی
۷	میزان مصرف منابع × شناوری آزاد	FFj*Ratej	صعودی
۸	میزان مصرف منابع × شناوری آزاد	FFj*Ratej	نزولی
۹	میزان مصرف منابع × شناوری جمعی	TFj*Ratej	صعودی
۱۰	میزان مصرف منابع × شناوری جمعی	TFj*Ratej	نزولی
۱۱	تعداد پیشنیازهای هر فعالیت	Number of Predecessor$_j$	صعودی
۱۲	تعداد پیشنیازهای هر فعالیت	Number of Predecessor$_j$	نزولی

۲-۲ـ تغییر روش محاسبه فاکتور بهبود

یکی از راه های پیشنهادی برای بهبود الگوریتم های تسطیح منابع نامحدود، توجه به اثر قدم های توالی است. در همهٔ الگوریتم های موجود، سعی می‌شود که عمل بهینه سازی درهر قدم توالی انجام شود. (بهینه‌های محلی) اما توجه به این بهینه‌های محلی الزاماً به معنی رسیدن به بهینهٔ سراسری نیست. در الگوریتم پیشنهادی، این مشکل به نوعی برطرف شده است. فعالیت هایی، کاندید جابجایی بیشتر هستند که فعالیت های پیشنیاز آنها در قدم رفت (یا فعالیتهای پس نیاز آنها در قدم برگشت) به شناوری نیاز داشته باشند. همچنین باید در نظر داشت که این فعالیت های پیش نیاز و پس نیاز باید میزان کاهش یافته در تسطیح منابع (به دلیل عدم انتخاب بهینه محلی) را جبران کند. فاکتور پیشنهادی مقدار حاصلضرب (TFj-FFj)*Ratej در نظر گرفته شده است. هر چه قدر مقدار این حاصلضرب برای یک فعالیت بیشتر باشد، امکان تغییر در هیستوگرام منابع توسط این فعالیت بیشتر است و در صورت جا به جایی فعالیت های بعد یا قبل آنها ممکن است تسطیح منابع را بهبود چشمگیری دهند. بنابراین فعالیت هایی انتخاب می‌شوند که فعالیت های پیش نیاز (پس نیاز در قدم برگشت) آنها دارای بیشترین مقدار از این حاصلضرب باشند.

میزان تخطی، میزان مجاز جابجایی یک فعالیت بیش از مقدار *IF (فاکتور بهبود بهینه) تعیین شده برای آن است. برای این منظور درصدی در نظر گرفته می‌شود. مثلا چنانچه ۱۰ درصد تخطی برای یک فعالیت مجاز باشد و *IF برای این فعالیت عدد ۲۰ باشد و میزان جابجایی برای *IF، ۵ واحد زمانی باشد، بیشترین میزان جا به جایی ممکن برای این فعالیت در صورتی که بزرگتر از ۵ واحد زمانی بوده و IF آن بین مقدار ۲۰ و ۱۸ باشد، انتخاب می‌شود.

برای اجرای الگوریتم پیشنهادی به دو پارامتر ورودی نیاز است:

۱ـ نسبت فعالیت های کاندید بهبود بالقوه به کل فعالیت های پروژه به درصد

۲ـ کل درصد تخطی نسبت به بهینه‌های محلی

ابتدا کلیه فعالیت های پروژه بر اساس حاصلضرب (TFj-FFj)*Ratej بصورت نزولی مرتب و سپس بر اساس نسبت "فعالیت های کاندید بهبود بالقوه" به کل فعالیت های پروژه، تعداد مشخصی از آنها از بالا انتخاب می‌شوند. برای مثال اگر یک پروژه ۱۶ فعالیت داشته باشد و درصد فعالیت های کاندید بهبود بالقوه به کل فعالیت های پروژه ۲۰ درصد باشد، (۳/۲=۱۶ × ۰/۲) ۳ فعالیت اول از فهرست مرتب شده انتخاب می‌شود و فهرست کاندید برای بهبود نامیده می‌شود. سپس کل درصد

تخطی به نسبت حاصلضرب Ratej*(TFj-FFj) میان این فعالیتها تقسیم می‌شود. کلّ عملیات فوق تنها یکبار و پیش از شروع قدم های رفت و برگشت صورت می‌گیرد. در هنگام اجرای الگوریتم هر فعالیتی که پیش نیازش در قدم رفت (و یا پس نیازش در قدم برگشت) یکی از فعالیت های فهرست کاندید برای بهبود باشد ، می‌تواند حداکثر به میزان تخطی تخصیص داده شده به فعالیت کاندید از *IF عدول کند. چنانچه در مورد یک فعالیت بیش از یک فعالیت از فهرست کاندید جزو پیشنیازها (یا پسنیازها) باشد، میزان درصد تخطی مجاز جمع مقادیر تخصیص داده شده به این فعالیتهای پیش نیاز یا پس نیاز می‌باشد.

۲-۳ـ گردش کار الگوریتم پیشنهادی

جز تفاوت مربوط به قانون اولویت مورد استفاده (بخش ۳-۱) و شیوهٔ محاسبه فاکتور بهبود (بخش ۳-۲)، سایر قدم های اصلی الگوریتم پیشنهادی شبیه الگوریتم هیاست می‌باشد.

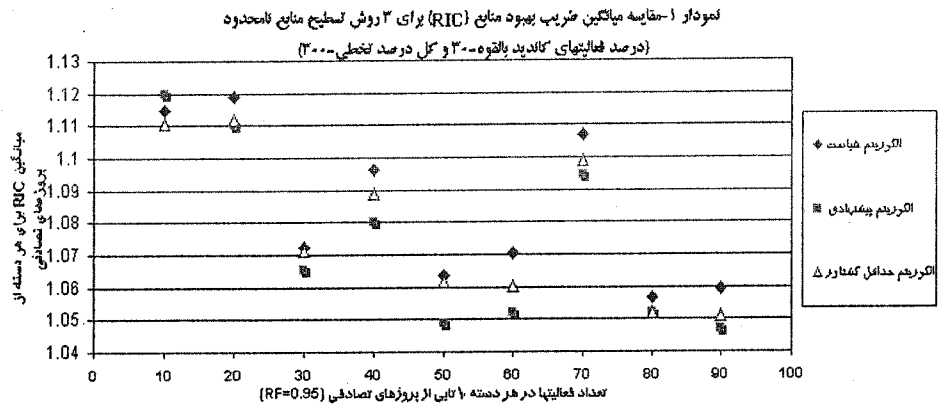
۳ـ مقایسه و بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم های موجود

در این قسمت، کارایی الگوریتم های پیشنهادی نسبت به الگوریتم های موجود مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مقایسه، الگوریتم های حداقل گشتاور، هیاست و الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده‌اند. همچنین برای بررسی کارایی و مقایسه الگوریتم های موجود، تعداد زیادی شبکهٔ تصادفی پروژه با تعداد فعالیتهای متفاوت ایجاد شده است. تعداد فعالیت های شبکه‌های پروژه از ۱۰ فعالیت تا ۹۰ فعالیت در نظر گرفته شده است. در منبع [۹] چگونگی ایجاد شبکه‌های تصادفی و مشخصات نرم‌افزارPROGEN آورده شده است. فاکتور منابع مورد استفاده برای ایجاد این شبکه‌های تصادفی (RF=0.95) بوده است. (یعنی، تعداد نسبتاً زیادی از فعالیت ها از منابع استفاده می‌کنند)

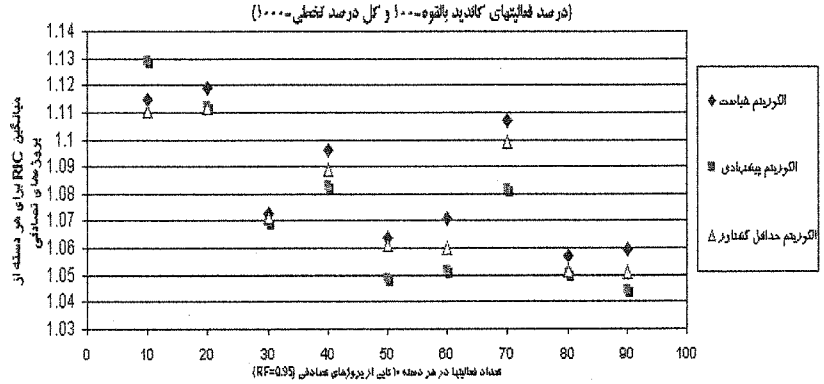
بنابراین در مجموع ۹۰ شبکهٔ تصادفی پروژه ایجاد شده است. مشخصات پروژه ها شامل زمان فعالیت ها ، روابط پیش نیازی و ... همگی به صورت تصادفی در نظر گرفته شده و برای سایر پارامترها مانند پیچیدگی شبکه[15] به صورت پیش‌فرض از اطلاعات نرم‌افزار PROGEN استفاده شده است. نمودارهای ۱ ، ۲ ،۳ و۴ نتایج عملکرد و نمودار ۵ مربوط به زمان حل هستند. نمودارهای ۱ و ۲ نشان‌دهندهٔ میانگین ضریب بهبود منابع پس از اجرایالگوریتم ها هستند. لازم به یادآوری است که کمتر بودن میزان ضریب بهبود منابع به معنای بهبود تسطیح منابع پروژه و عملکرد بهترالگوریتم است. نمودارهای ۳ و۴ پراکندگی جواب ها را نشان می‌دهند که کمتر بودن آن، نشان دهنده ثبات الگوریتم است. نمودار ۵ نیز روند تغییرات زمان حل را نسبت به تغییر ابعاد مساله (تعداد فعالیتهای پروژه) نشان می‌دهد.

جدول (۲) مشخصات پروژه‌های تصادفی ایجاد شده.

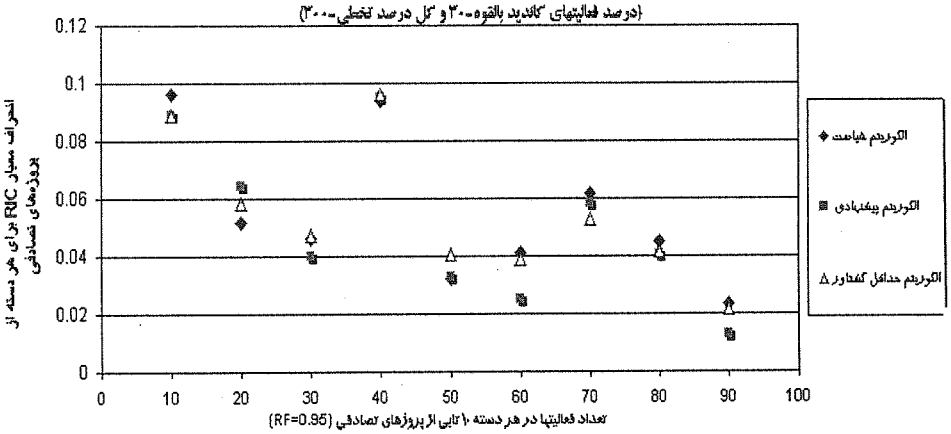
تعداد فعالیت	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
تعداد شبکه تصادفی ایجاد شده	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰



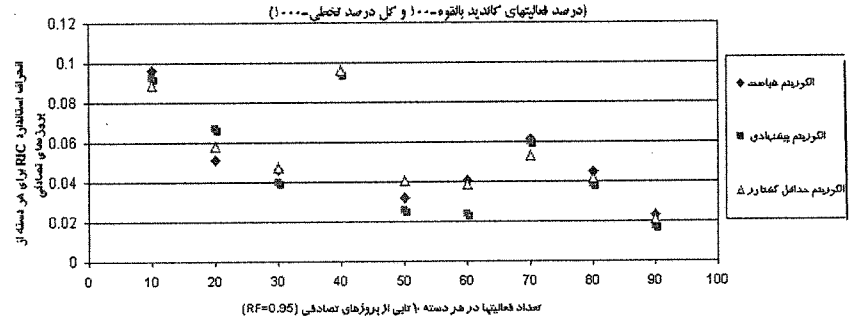
نمودار ۲- مقایسه میانگین ضریب بهبود منابع (RIC) برای ۳ روش تسطیح منابع نامحدود
(درصد فعالیتهای کاندید بالقوه=۱۰۰ و کل درصد تخصیص=۱۰۰۰)



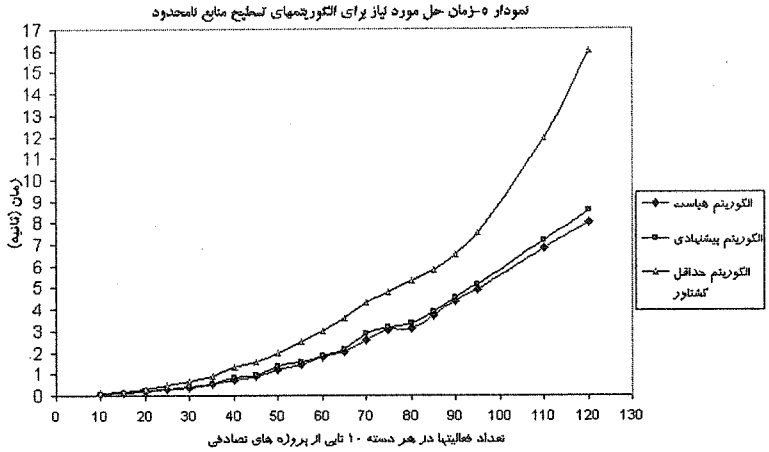
نمودار ۳-مقایسه انحراف استاندارد ضریب بهبود منابع (RIC) برای ۳ روش تسطیح منابع نامحدود
(درصد فعالیتهای کاندید بالقوه=۳۰۰ و کل درصد تخصیص=۳۰۰)



نمودار ٤- مقایسه انحراف استاندارد ضریب بهبود منابع (RIC) برای ۳ روش تسطیح منابع نامحدود
(درصد فعالیتهای کاندید بالقوه=۱۰۰ و کل درصد تخصیص=۱۰۰۰)



نمودار ٥-زمان حل مورد نیاز برای الگوریتمهای تسطیح منابع نامحدود



٤ـ نتیجه‌گیری

٤-١ـ بررسی کارایی

١ـ الگوریتم پیشنهادی (نمودار ١) به صورت میانگین از همهٔ الگوریتم های موجود بهتر عمل کرده است. (جز برای پروژه‌های با اندازه ١٠ فعالیت). علّت این که این الگوریتم در مورد حالاتی که پروژه، تعداد فعالیت بسیار کمی (١٠ فعالیت) دارد، ضعیفتر عمل می‌کند می‌تواند به محدود بودن فضای حل در پروژه‌های کوچک مربوط باشد چرا که وقتی فضای حل محدود باشد، ایجاد تخطی نسبت به بهینه‌های محلی ممکن، ما را از جواب بهینهٔ نهایی دور کند، اما برای همهٔ دسته پروژه‌های دارای بیش از ٢٠ فعالیت، الگوریتم پیشنهادی بهتر عمل می‌کند. در نمودار-٢ پارامترهای الگوریتم پیشنهادی افزایش داده شده که مشاهده می‌شود با افزایش این پارامتر عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مورد پروژه‌های با اندازه کم، کاهش یافته اما در مورد پروژه‌های با اندازه‌های بیشتر از ۴٠ فعالیت، بهتر شده است و یا ثابت مانده است.

٢ـ با بررسی نمودارهای ٣ و ۴ مشاهده می‌شود که انحراف معیار الگوریتم پیشنهادی نیز در اکثر موارد از الگوریتم های موجود کمتر بوده و با تعییر مقدار پارامترهای الگوریتم پیشنهادی نیز تغییر نکرده است.

٣ـ از مجموع موارد مطرح شده می‌توان نتیجه گیری کرد که با توجه به نتایج حاصل از تسطیح پروژه‌های تصادفی، الگوریتم پیشنهادی (بجز در مورد پروژه‌های با اندازه خیلی کم یعنی حدود ١٠ فعالیت) از الگوریتم های موجود تسطیح منابع نامحدود بهتر عمل می‌کند.

٤-٢ـ بررسی زمان حل

همانگونه که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود، زمان حلّ الگوریتم پیشنهادی تقریبا شبیه الگوریتم هیاست می‌باشد. (الگوریتم هیاست در ادبیات موضوع، کمترین زمان حل را در میان الگوریتمهای موجود دارد.) همچنین مشاهده می‌شود زمان حل الگوریتم حداقل گشتاور با زیاد شدن تعداد فعالیتهای پروژه، شکل تابع نمایی به خود می‌گیرد و در نتیجه کاربرد این الگوریتم برای پروژه های با ابعاد زیادتر، مناسب نخواهد بود و لازم است که از یکی از الگوریتم های پیشنهادی و یا هیاست استفاده شود و با توجه به عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم هیاست، کاربرد الگوریتم پیشنهادی برای پروژه‌های با ابعاد زیاد نیز توجیه‌پذیر خواهد بود.

٤-٣ـ پیشنهاد برای توسعه آتی

برای توسعهٔ الگوریتم های تسطیح منابع نامحدود موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

١ـ توسعه الگوریتم ها برای تسطیح مناسب چند منبع به صورت همزمان و تولید جواب های غیر پست[١۶]

٢ـ استفاده از روش های جستجوی فضای حل مانند الگوریتم ژنتیک

٣ـ در نظر گرفتن زمانها و نرخ مصرف منابع به صورت غیرقطعی[١٧]

۴ـ امکان قطع فعالیت ها پس از شروع آنها و سپس از سرگیری مجدد اجرای آنها[١٨]

نماد گذاری

N: حداقل طول زمان اجرای پروژه (خروجی روش مسیر بحرانی)

y_i مجموع میزان مصرف منابع توسط فعالیتها در زمان i

ES_j زودترین زمان شروع فعالیت j

dis_j میزان جابجایی فعالیت j نسبت به زودترین زمان شروع

$rate_j$ زمان اجرای فعالیت j

d_j میزان مصرف منابع توسط فعالیت j

زیرنویس‌ها

1-Project Management Body of Knowledge (PMBOK)
2- Schedule
3- Milestone
4-Critical Path Method (CPM)
5- Explicit Enumeration
6- Activity On Arrow
7- Pack
8- Decision Support System
9- Step Sequence
10- Duration
11- Improvement Factor
12-Free Float
13- Resource Improvement Coefficient
14- Sort
15- Network Complexity
16 Non-Inferior Solutions
17- Stochastic

مراجع

[1] Ahuja, H.N., "Construction performance control by networks", Wiley, New York (1976)
[2] Chan, W.T., Chua D.K.H. and Kannan, G., "Construction resource scheduling with genetic algorithms", Journal of Construction Engineering ans Management, ASCE 122 (2) 125-132 (1996)
[3] Easa, S.M. "Resource leveling in construction by optimization" , Journal of Construction Engineering ans Management, ASCE 115 (2) 302-306 (1989)
[4] Harris, R.B., "Precedence and arow networking techniques for construction", John Wiley and Sons, New York (1978)
[5] Harris, R.B., "Packing method for resource leveling (PACK)", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE 116 (2) 331-350 (1990)
[6] Hiyasat, M.A.S "Modification of minimum moment approach in resource leveling", Journal of Construction Engineering ans Management, . ASCE 126(4) , 278-284 (2000)
[7] Hiyasat, M.A.S. "Applying modified minimum moment method to multiple resource leveling, Journal of Construction Engineering ans Management, ASCE 127(3), 192-198 (2001)
[8] Khattab, M. M. and Soyland K., "Limited-resource allocation in construction projects", Computers and Industrial Engineering 31,No. ½ 229-232 (1996)
[9] Kolisch R., Sprecher, A., Drexl, A., (1995) "Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems "Management Science 41, 1693-1703
[10] Leu S.S.,Yang C.H. and Huang J.C, "Resource levelinginconstruction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application", Automation in Construction 10,27-41(2000)
[11] Martinez, J.C and Ioannou, P.G, "CPMlevel, resource leveling using the generalized minimum moment algorithm, user's guide", Technical Report UMCEE 92-15, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (1992)
[12] Project Management Institute, "A guide to project management body of knowledge (PMBOK Guide)", Project Management Institute Publication, ISBN: 1-880410-22-2 (2000)
[13] Savin, D., Alkass, S. and Fazio, P., "Construction resource leveling using neural networks", Canadian Journal of Civil Engineering 23(4) ,917-925 (1996)
[14] Younis, M.A. and Saad, B., "Optimal resource leveling of multi-resource projects", Computers and Industrial Engineering 31,1-4 (1996)