Archive of SID

نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره۴۴، شماره ۱، فروردین ماه ۱۳۸۹، از صفحه ۱۳ تا ۲۴

توسعه مدل زمانبندی پروژه با اهداف زمان ختم و مقاومت زمانبندی

ایمان بساق‌زاده[۱]، سیدرضا حجازی[*۲] و امیرموسی احسان[۳]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۳] دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت ۸۸/۵/۱۲ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱۰/۸ ، تاریخ تصویب ۸۸/۱۲/۱۹)

چکیده

یکی از مشکلات رایج در مدیریت پروژه، اختلال زمانبندی‌ها در اثر عوامل کنترل نشدنی حین اجرای پروژه است. در نتیجه، مدیران پروژه اغلب در پایبندی به تعهداتشان دچار مشکل می‌شوند. بنابراین زمانبندی پروژه علاوه بر زمان ختم کوتاه باید حین اجرا دچار کمترین اختلال شود. در این مقاله پس از بیان مفهوم مقاومت زمانبندی، یک مدل زمانبندی پروژه با اهداف کمینه کردن زمان ختم پروژه و بیشینه کردن مقاومت زمانبندی، توسعه داده می‌شود. در این مدل، دو تابع جانشین که یکی مربوط به ادبیات موضوع و دیگری جدید است، به‌منظور هدف مقاومت به کار گرفته شده است. همچنین، یک الگوریتم جستجوی ممنوعه برای تولید جواب‌های کارا توسعه داده شده است که با استفاده از آن، مجموعه‌ای از مسائل تصادفی حل می‌شود. در نهایت، از طریق شبیه‌سازی جواب‌ها، میزان کارآیی الگوریتم و توابع جانشین مقاومت ارزیابی شده است. با توجه به این نتایج، برتری نسبی تابع جانشین جدید به خوبی نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زمانبندی پروژه، عدم قطعیت، مقاومت زمانبندی، توابع هدف جانشین

مقدمه

زمانبندی، یکی از مسائل مهم در مرحله برنامه‌ریزی پروژه است. زمانبندی پروژه عبارت است از تعیین زمان شروع هر یک از فعالیت‌های پروژه با توجه به محدودیت‌ها و به منظور رسیدن به یک یا چند هدف مشخص [۱]. با استفاده از زمانبندی پروژه، مواردی همچون تخصیص منابع به فعالیت‌ها، تعهدات پیمانکاران، تعمیرات پیش‌گیرانه و تحویل سفارش به مشتری داخلی یا خارجی به راحتی قابل برنامه‌ریزی و کنترل خواهد بود. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای روی موضوع زمانبندی پروژه انجام شده است. بیشتر تحقیقات انجام شده با فرض دسترسی به اطلاعات کامل و وجود یک مسئله قطعی انجام گرفته است. یکی از اشکال‌های اساسی مدل‌های قطعی زمانبندی پروژه این است که در آنها فرض می‌شود فعالیت‌ها در یک شرایط ایده‌آل انجام می‌گیرد و زمانبندی ارائه‌شده می‌تواند به طور دقیق مطابق با برنامه اجرا شود. اگر چه در عمل، وجود چندین عامل کنترل نشدنی نظیر افزایش زمان اجرای فعالیت‌ها، نبود دسترسی به منابع، اضافه شدن فعالیت‌های پیش‌بینی نشده به پروژه، شرایط بد آب و هوایی و غیره، ممکن است منجر به ایجاد اختلال‌هایی در زمانبندی پروژه شود. این اختلال‌ها می‌تواند هزینه‌های قابل توجهی به سیستم پروژه تحمیل کند.

یکی از مهم‌ترین مسائل در بحث زمانبندی پروژه مدل RCPSP [۱] است. از زمان پیدایش این مدل در سال ۱۹۶۹ تا کنون مطالعات بسیاری روی آن انجام شده است [۲]. محدودیت‌های اصلی این مدل شامل سطح دسترسی به منابع و روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه است. همچنین، تابع هدف آن اغلب کمینه کردن زمان ختم پروژه است. همه‌ی عوامل این مدل که جزء دسته مسائل NP-Hard است، به طور قطعی است. قطعیت عوامل پروژه یک فرض اساسی در مدل RCPSP است؛ در حالی که استفاده از مقادیر قطعی در ایجاد یک زمانبندی، می‌تواند مشکلاتی را حین اجرای پروژه به وجود آورد. چه بسا قبل از شروع پروژه یک زمانبندی بهینه با استفاده از مقادیر قطعی ایجاد شود، ولی آن زمانبندی در حین اجرا به دلیل نبود قطعیت عوامل پروژه بارها، دچار اختلال شود. در این حالت برای تابع هدف مورد نظر که در ابتدا بهینه شده بود، در عمل یک مقدار ضعیف و دور از انتظار به دست می‌آید. از این رو، اعتبار زمانبندی‌های قطعی اغلب زیر سؤال می‌رود. در سال‌های اخیر برای مواجهه با

* نویسنده مسئول : تلفن : ۳۹۱۵۵۰۶-۰۳۱۱ ، فاکس : ۳۹۱۵۵۲۶-۰۳۱۱ ، Email: rehejazi@ce.iut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

نبود قطعیت عوامل یک مسئله زمانبندی، چندین رویکرد جدید توسعه داده شده است. در ابتدا، همه این رویکردها کم و بیش در مسئله زمانبندی کارها روی یک ماشین بررسی شده است. به تازگی، دامنه بحث برخی از آنها به مسئله زمانبندی پروژه نیز کشیده شده است [۳]. رویکرد زمانبندی مقاوم[۲] یکی از جدیدترین رویکردهای مواجهه با نبود قطعیت عوامل پروژه است. با استفاده از این رویکرد می‌توان زمانبندی را به نحوی ایجاد کرد که تغییر مقادیر عوامل حین اجرای پروژه تا آنجا که ممکن است منجر به اختلال در زمانبندی نشود.

در این مقاله، یک مدل دوهدفه[۳] برای RCPSP توسعه داده شده است. اهداف این مدل عبارتند از بیشینه کردن مقاومت زمانبندی و کمینه کردن زمان ختم پروژه. هدف از این کار این است که زمانبندی پروژه، علاوه بر زمان ختم کوتاه در مقابل تغییرات و عوامل پیش‌بینی نشده دچار کمترین اختلال شود. در ادامه این مقاله ابتدا مفهوم رویکرد زمانبندی مقاوم و انواع آن بیان شده است. سپس مروری بر تحقیقات قبلی مربوط به رویکرد زمانبندی مقاوم در پروژه انجام گرفته است. پس از توسعه یک تابع جانشین[۴] جدید برای معیارهای مقاومت، یک مدل دوهدفه برای تولید زمانبندی‌های کوتاه و در عین حال مقاوم توسعه داده شده است. سپس یک الگوریتم جستجوی ممنوعه[۵] نیز برای تولید جواب‌های کارای[۶] این مدل توسعه داده می‌شود. برای ارزیابی عملکرد این الگوریتم و توابع جانشین مقاومت، آزمایش‌های محاسباتی گسترده‌ای با استفاده از شبیه‌سازی انجام گرفته است. در نهایت جمع‌بندی این مقاله در بخش پایانی آن انجام می‌گیرد.

مروری بر مفهوم و تحقیقات زمانبندی مقاوم

- مفهوم رویکرد زمانبندی مقاوم و انواع آن

برای هر مسئله‌ی برنامه‌ریزی، به جوابی مقاوم می‌گویند که تغییرات جزیی مقادیر عوامل، تأثیر قابل توجهی در مقدار اولیه تابع هدف نداشته باشد و جواب اولیه همچنان یک جواب قابل قبول باقی بماند [۴]. در رویکرد زمانبندی مقاوم با پیش‌بینی تغییراتی که حین اجرای پروژه به‌وجود می‌آید، یک زمانبندی مقاوم ایجاد می‌شود. بدین منظور می‌توان از اطلاعات مربوط به ویژگی‌های تغییرات، نظیر توزیع احتمال عوامل غیرقطعی استفاده کرد. در رویکرد زمانبندی مقاوم دو نوع تابع هدف (معیار) مطرح است[۵]:

۱. معیار مقاومت کیفی[۷]: با استفاده از این معیار، زمانبندی به نحوی ایجاد می‌شود که تغییر عوامل تا آنجا که ممکن است مانع تجاوز زمان ختم واقعی پروژه از موعد تحویل آن شود. تابع هدف مربوط به این معیار به شکل کمینه‌کردن زمان ختم واقعی پروژه است که یک متغیر غیر قطعی است. کاهش مقدار این تابع برای یک پروژه به منزله افزایش مقاومت کیفی است. یکی از مهم‌ترین کارهای تحقیقاتی در این زمینه، رویکرد زنجیره بحرانی است که در سال ۱۹۹۷ توسط گلدرات ارائه شد [۶].

۲. معیار مقاومت جواب[۸]: با استفاده از این معیار، زمانبندی به نحوی ایجاد می‌شود که تغییر عوامل تا آنجا که ممکن است مانع انحراف زمان شروع واقعی فعالیت‌ها از زمان شروع برنامه‌ریزی شده‌ی آنها شود. تابع هدف مربوط به این معیار برای یک پروژه با N فعالیت، به صورت کمینه کردن رابطه ۱ است.

$$\sum_{j=1}^{N} w_j \mid S_j - s_j \mid \qquad (۱)$$

در این رابطه، متغیرهای s_j و S_j به ترتیب نشان‌دهنده زمان شروع برنامه‌ریزی شده و واقعی فعالیت $\mathbf{j}$ است. اگر $S_j > s_j$ باشد، آنگاه w_j معرف وزن تأخیر و در غیر این صورت معرف وزن تعجیل فعالیت $\mathbf{j}$ است. قابل ذکر است که S_j یک متغیر غیرقطعی است. کاهش مقدار رابطه ۱ برای یک پروژه به منزله افزایش مقاومت جواب است. اولین کار تحقیقاتی مهم در این زمینه در سال ۲۰۰۳ توسط لوییز ارائه شد [۴].

به‌کارگیری معیار مقاومت کیفی برای مدیران پروژه اغلب کارا است، چرا که برای آنها مطلوب است که زمان ختم واقعی پروژه نسبت به موعد تحویل آن افزایش قابل توجهی نداشته باشد. از سوی دیگر، ممکن است شرایط بعضی از پروژه‌ها به‌گونه‌ای باشد که در صورت به وجود آمدن انحراف در زمان شروع برخی از فعالیت‌ها، هزینه قابل توجهی به سیستم پروژه تحمیل شود. در این شرایط، به‌کارگیری معیار مقاومت جواب بسیار مطلوب خواهد بود. برای مثال استفاده از این معیار در زمانبندی حرکت قطارها و هواپیماها، مسابقات ورزشی و کنفرانس‌ها بسیار مطلوب‌تر از کمینه کردن یا محافظت از زمان ختم پروژه است.

www.SID.ir

Archive of SID

- مروری بر تحقیقات زمانبندی مقاوم

از آنجا که رویکرد زمانبندی مقاوم، یک مقوله‌ی جدید در بحث زمانبندی پروژه است، بنابراین تحقیقات انجام‌شده در این زمینه تا حدودی کم است. اکثر مقالات جدید درباره مدیریت پروژه، رویکرد CC/BM[9] گلدرات را مهم‌ترین پیشرفت در تاریخ مدیریت پروژه می‌دانند. هدف اصلی این رویکرد، ایجاد زمانبندی مقاوم در حالت نبود قطعیت زمان اجرای فعالیت‌ها و با معیار مقاومت کیفی است. در این رویکرد با استفاده از مفهوم زنجیره‌ها و به کمک بافرها یک زمانبندی مقاوم ایجاد می‌شود [۶]. هرولن در سال ۲۰۰۱ به بررسی نقاط قوت و ضعف رویکرد CC/BM پرداخته است [۷]. وی در سال ۲۰۰۴ نیز یکی از اولین مقالات مهم در رابطه با زمانبندی پروژه بدون محدودیت منابع و با معیار مقاومت جواب را ارائه کرده است [۸]. فرض اساسی این مقاله، وجود سناریوهای "فقط یک تغییر"[10]در حالت نبود قطعیت زمان اجرای فعالیت‌ها است؛ بدین معنا که در طول اجرای پروژه فقط زمان اجرای یک فعالیت دچار تغییر می‌شود. فاندوندر و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به موازنه معیارهای مقاومت کیفی و مقاومت جواب پرداخته‌اند[۹]. در مدل آنها، زمانبندی پروژه بدون محدودیت منابع و زمان اجرای فعالیت‌ها غیرقطعی در نظر گرفته شده است. در این مقاله، آزمایش‌های گسترده‌ای از طریق شبیه‌سازی انجام شده است. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی این موضوع است که در چه شرایطی از زمان تحویل پروژه و در چه شرایطی از زمان شروع سایر فعالیت‌های پروژه باید محافظت شود. فاندوندر و همکارانش در سال ۲۰۰۶ این آزمایش‌ها را برای مدل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع نیز انجام داده‌اند [۱۰]. آنها در سال ۲۰۰۸ نیز چند الگوریتم ابتکاری به منظور ایجاد زمانبندی مقاوم در حالت نبود قطعیت زمان اجرای فعالیت‌های پروژه و با معیار مقاومت جواب ارائه کرده‌اند [۱۱]. لمبریج و همکارانش در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار رویکردی را مطرح کردند که برای ایجاد زمانبندی مقاوم به جای زمان اجرای فعالیت‌های پروژه، عامل سطح دسترسی به منابع غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود [۱۲-۱۳]. در این رویکرد هر منبع می‌تواند دچار از کارافتادگی‌های پیش‌بینی نشده شود. هدف مقاله آنها، ایجاد زمانبندی مقاوم با معیار مقاومت جواب است. الفازان در سال ۲۰۰۵ معیارهای زمان ختم و مقاومت را با هم به عنوان اهداف RCPSP در نظر گرفته است [۱۴]. در این مقاله از مجموع شناوری آزاد[11] فعالیت‌ها به عنوان تابع جانشین معیار مقاومت استفاده شده است. کابیلانسکی در سال ۲۰۰۷ مقاله الفازان را بررسی و نقاط ضعف آن را بیان کرده‌اند [۱۵]. اکنون در این مقاله پس از رفع اشکالات اساسی وارد بر مقاله الفازان، یک الگوریتم جستجوی ممنوعه برای تولید مجموعه جواب‌های کارا توسعه داده می‌شود.

توسعه مدل زمانبندی پروژه و روش حل آن

- توابع جانشین معیارهای مقاومت

در صورت غیرقطعی بودن عوامل پروژه، زمان شروع واقعی فعالیت‌ها نیز غیرقطعی خواهد بود. از این رو، محاسبه مقدار توابع مربوط به معیارهای مقاومت بسیار پیچیده است[۴]. یکی از راه‌های مناسب برای حل مسائلی با توابع هدف پیچیده این است که به جای تابع هدف اصلی از یک تابع هدف جانشین استفاده شود. مهم‌ترین ویژگی توابع هدف جانشین، سادگی محاسبه مقدار آنها است. یک تابع هدف جانشین مناسب باید معادل و هم‌سو با معیار اصلی مسئله باشد. به عبارت دیگر، اگر مقدار تابع هدف اصلی یک مسئله به ازای جواب a بهتر از جواب b بود، مقدار تابع هدف جانشین نیز در جواب a بهتر از b باشد. استفاده از این روش، حل مسئله را ساده‌تر و زمان محاسباتی آن را کاهش می‌دهد. الفازان برای معیار مقاومت از مجموع شناوری آزاد فعالیت‌ها به عنوان یک تابع جانشین استفاده کرده است[۱۴]. شناوری آزاد یک فعالیت در زمان‌بندی S به معنی مقدار زمانی است که آن فعالیت در زمان‌بندی S می‌تواند به تأخیر بیافتد، بدون اینکه تأثیری در زمان شروع سایر فعالیت‌ها داشته باشد [۱]. اختلال در هر یک از فعالیت‌های پیش‌نیاز می‌تواند منجر به تأخیر در زمان شروع فعالیت‌های پس‌نیاز شود. اگر یک فعالیت شناوری آزاد داشته باشد، فعالیت‌های پس‌نیاز آن با احتمال کمتری به تعویق خواهد افتاد.

مقاله الفازان دو اشکال اساسی دارد. اولین اشکال آن، گنگ بودن نوع معیار مقاومت است. در مقاله الفازان به طور صریح اشاره نشده است که مجموع شناوری آزاد فعالیت‌ها، جانشین کدام معیار مقاومت است. به عبارت دیگر، مشخص نیست که منظور آن معیار مقاومت کیفی است یا مقاومت جواب. دومین و مهم‌ترین اشکال مقاله

www.SID.ir

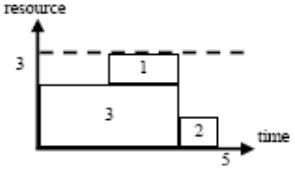
Archive of SID

الفازان مربوط به نامناسب بودن تابع جانشین مقاومت است. نشان داده شده است که مجموع شناوری آزاد فعالیت‌های پروژه، جانشین مناسبی برای هیچ یک از معیارهای مقاومت کیفی و مقاومت جواب نیست[۱۵].

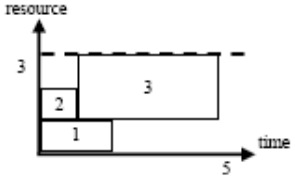
در اینجا با استفاده از یک مثال نشان داده می‌شود که مجموع شناوری آزاد فعالیت‌ها نمی‌تواند جانشین مناسبی برای معیار مقاومت باشد. یک پروژه را با ۳ فعالیت و با موعد تحویل ۵ واحد زمانی در نظر بگیرید. فرض کنید که این فعالیت‌ها هیچگونه رابطه پیش‌نیازی با یکدیگر ندارند و تنها از یک نوع منبع تجدیدشدنی استفاده می‌کنند. میزان دسترسی به این منبع برابر ۳ واحد در طول زمان است. در جدول (۱)، زمان اجرا و مقدار استفاده از منبع در هر واحد زمانی برای هر یک از فعالیت‌ها نشان داده شده است. در شکل‌های (۱) و (۲) نیز دو زمانبندی شدنی برای این پروژه ارائه شده است.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به فعالیت‌های پروژه مثال.

Activity	Duration	Resource Usage
1	2	1
2	1	1
3	4	2



شکل ۱: زمانبندی ۱.



شکل ۲: زمانبندی ۲.

مجموع شناوری‌های آزاد در زمانبندی ۱ برابر ۲ واحد است که مربوط به فعالیت‌های ۱ و۳ است. در حالی که این مقدار برای زمانبندی ۲ برابر ۳ واحد است که همگی مربوط به فعالیت ۱ است. فرض کنید که تنها عامل غیرقطعی این مسئله زمان اجرای فعالیت‌ها است و این عامل در صورت تغییر، یک واحد افزایش می‌یابد. اگر در عمل احتمال افزایش زمان اجرای تمام فعالیت‌ها برابر باشد، آنگاه احتمال تجاوز زمان ختم واقعی پروژه از موعد تحویل آن برای زمانبندی ۱ کمتر از زمانبندی ۲ است. بنابراین از نظر معیار مقاومت کیفی، زمانبندی ۱ مقاوم‌تر از زمانبندی ۲ است؛ اگر چه مجموع شناوری‌های زمانبندی ۱ کوچک‌تر است. اگر فرض کنیم که وزن تأخیر همه فعالیت‌ها برابر باشد، واضح است که امید ریاضی تابع مقاومت جواب (رابطه ۱) برای زمانبندی ۱ کوچک‌تر از زمانبندی ۲ است. بنابراین، از نظر معیار مقاومت جواب نیز زمانبندی ۱ مقاوم‌تر است. بنابراین، نشان دادیم که تابع مجموع شناوری آزاد فعالیت‌ها، نمی‌تواند جانشین مناسبی برای هیچ یک از معیارهای مقاومت باشد. دلیل عمده این نقیصه، توجه نکردن این تابع به نحوه تخصیص شناوری‌ها است. در اینجا با اصلاح نحوه تخصیص شناوری‌ها، یک تابع جانشین جدید برای معیارهای مقاومت توسعه داده شده است.

در تابع مجموع شناوری آزاد فعالیت‌ها به عنوان جانشین معیارهای مقاومت، اهمیت شناوری برای همه فعالیت‌های پروژه یکسان در نظر گرفته می‌شود. در حالی که تخصیص شناوری‌ها به فعالیتی که پس‌نیازهای آن هزینه دیرکرد بیشتری داشته باشد، مطلوبیت بیشتری خواهد داشت. چرا که، افزایش زمان اجرای این گونه فعالیت‌ها اثر بیشتری بر توابع مربوط به معیارهای مقاومت دارد. بنابراین برای تخصیص شناوری‌ها، فعالیتی باید در اولویت قرار بگیرد که مجموع هزینه دیرکرد پس‌نیازهای آن بزرگ‌تر باشد. بنابراین ما از تابع مجموع وزنی شناوری آزاد فعالیت‌ها استفاده خواهیم کرد، به طوری که وزن شناوری آزاد هر فعالیت، معادل با هزینه یک واحد دیرکرد پس‌نیازهای آن در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، هر واحد شناوری آزاد اضافه برای یک فعالیت خاص نباید مطلوبیت یکسانی نسبت به شناوری‌های قبلی داشته باشد. چرا که، تخصیص شناوری آزاد به فعالیت‌ها تا حدی مورد نیاز خواهد بود و بیش از آن به‌کار نخواهد آمد. بنابراین، هر واحد شناوری آزاد مطلوبیت کمتری نسبت به واحد قبلی تخصیص یافته خواهد داشت. برای مثال اگر فرض کنیم که مطلوبیت حاصل از تخصیص یک واحد شناوری آزاد به فعالیتی برابر A باشد، آنگاه مطلوبیت حاصل از تخصیص دو واحد شناوری آزاد به این فعالیت کمتر از $2A$ است.

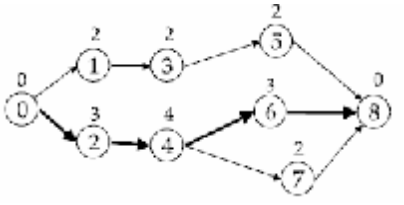
www.SID.ir

Archive of SID

با اعمال اصلاحات بیان شده، تابع جانشین معیارهای مقاومت به شکل رابطه ۲ توسعه داده می‌شود. افزایش مقدار این رابطه می‌تواند منجر به افزایش مقاومت زمانبندی شود.

$$R = \sum_{i=1}^{N} CWS_i \sum_{j=1}^{FF_i} e^{-j} \qquad (۲)$$

در این رابطه CWS_i [۱۲] شاخصی است که نشان‌دهنده‌ی وزن تجمعی همه پس‌نیازهای فعالیت i است. برای درک این مفهوم، شبکه پروژه نشان داده شده در شکل (۳) را در نظر بگیرید. هر گره و عدد بالای آن در این شکل به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی یک فعالیت پروژه و هزینه دیرکرد آن فعالیت به‌ازای هر واحد زمانی است.



شکل ۳: یک شبکه پروژه برای مثال.

در جدول (۲)، شاخص CWS برای فعالیت‌های این پروژه محاسبه شده است. یادآوری می‌شود که فعالیت‌های ۰ و ۸ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی زمان شروع و پایان پروژه است.

جدول ۲: مقدار CWS فعالیت‌های مربوط به شکل ۳.

Activity	1	2	3	4	5	6	7
CWS	4	9	2	5	0	0	0

از آنجا که تخصیص هر واحد شناوری آزاد به یک فعالیت خاص، مطلوبیت کمتری نسبت به واحد تخصیص یافته قبلی دارد، در رابطه ۲ از یک تابع نزولی نمایی استفاده شده است. در این رابطه، FF_i معرف شناوری آزاد فعالیت i است. در این مقاله علاو ه بر تابع جانشین جدید، از تابع جانشین مقاله الفازان [۱۴] نیز استفاده شده است. این‌کار برای مقایسه عملکرد دو تابع جانشین انجام گرفته است.

- یک مدل دوهدفه

مدل ما به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه فرموله می‌شود که اهداف آن عبارتند از: کمینه‌کردن زمان ختم پروژه و بیشینه کردن مقاومت زمانبندی. تابع هدف این مدل به صورت کمینه کردن رابطه ۳ است.

$$Z_\lambda = \lambda . Z_M - (1-\lambda) . Z_R \qquad (۳)$$

در این رابطه، Z_λ نشان‌دهنده‌ی تابع هدف مدل به ازای ضریب λ است. همچنین، Z_M و Z_R نشان‌دهنده‌ی معیارهای مدل است که به ترتیب معرف زمان ختم پروژه و تابع جانشین مقاومت است. ضریب λ ($0 \le \lambda \le 1$) که اهمیت معیار زمان ختم پروژه نسبت به مقاومت زمانبندی را نشان می‌دهد، نقش بسیار مهمی در تعیین جواب مسئله دارد. با استفاده از روش پارامتریک و با تغییر مقادیر λ می‌توان جواب‌های کارای این مسئله را به‌دست آورد. جواب A را کارا می‌گوییم، به شرطی که جواب دیگری که حداقل در یک هدف بهتر از A و در سایر اهداف بدتر نباشد، یافت نشود[۱۶]. اگر $\lambda = 1$ و $\lambda = 0$ باشد، هدف این مسئله به ترتیب معادل با کمینه‌کردن زمان ختم پروژه و بیشینه‌کردن مقاومت زمانبندی است.

از آنجا که مقیاس معیارهای مقاومت زمانبندی و زمان ختم پروژه یکسان نی‌ست، ممکن است جواب‌های حاصل از رابطه ۳ مناسب نباشد [۱۴]. برای جلوگیری از این مشکل، معیارهای این مدل به طور نسبی در نظر گرفته می‌شود؛ به طوری که تابع Z_λ به شکل رابطه ۴ نرمال شود. در این رابطه، W_λ نشان‌دهنده‌ی تابع هدف نرمال‌شده به ازای ضریب λ است. همچنین، $Z_{M(0)}$ و $Z_{R(0)}$ به ترتیب معرف زمان ختم پروژه و مقاومت یک زمانبندی اولیه است. یادآوری می‌شود که این تابع نرمال‌شده، بیانگر بهبود نسبی معیارها است.

$$W_\lambda = \lambda . \left(\frac{Z_M - Z_{M(0)}}{Z_{M(0)}} \right) - (1-\lambda) . \left(\frac{Z_R - Z_{R(0)}}{z_{R(0)}} \right) \qquad (۴)$$

- توسعه یک الگوریتم جستجوی ممنوعه

نشان داده شده است که الگوریتم جستجوی ممنوعه، یکی از مناسب‌ترین روش‌های حل مدل RCPSP است[۱۷]. زیربنای این الگوریتم، همان روش جستجوی همسایگی‌ها[۱۳] است؛ در حالی که وجه تمایز اصلی آن با روش جستجوی همسایگی‌ها این است که در آن امکان

www.SID.ir

Archive of SID

پذیرش جواب‌های بدتر نیز در هر مرحله وجود دارد. از این رو، این الگوریتم در نقاط بهینه محلی [۱۴] متوقف نخواهد شد. همچنین، در این الگوریتم برای جلوگیری از ایجاد جواب‌های تکراری از لیست ممنوعه[۱۵] استفاده می‌شود. گلاور در رابطه با الگوریتم جستجوی ممنوعه تحقیقات زیادی انجام داده است [۱۸]. در این مقاله برای یافتن مجموعه جواب‌های کارای مدل، یک الگوریتم جستجوی ممنوعه توسعه داده می‌شود. بخش‌های اصلی این الگوریتم عبارتند از: ۱- ارائه جواب (زمانبندی) اولیه ۲- ساختار تولید همسایگی ۳- روش انتخاب جواب ۴- تنظیم عامل.

۱. ارائه زمانبندی اولیه به عنوان ورودی الگوریتم:

هر زمانبندی با استفاده از بردار $S=(s_1,s_2,...,s_N)$ توصیف می‌شود که در آن s_i نشان‌دهنده‌ی زمان شروع فعالیت i است. مقادیر این بردار با استفاده از روش SGS[۱۶] تعیین می‌شود. این روش محور اکثر الگوریتم‌های ابتکاری برای حل مدل RCPSP است[۱۷]. در این روش، فعالیت‌های پروژه به ترتیب یک لیست اولویتی[۱۷] (P) در زودترین زمانی که محدودیت منابع برقرار باشد، زمانبندی می‌شود. در واقع، ترتیب موجود در لیست P معرف اولویت فعالیت‌های پروژه برای زمانبندی است. بنابراین، با تعیین این لیست می‌توان یک زمانبندی اولیه ارائه کرد. در این مقاله برای تعیین لیست P از شاخص CWS فعالیت‌ها استفاده می‌شود. بدین صورت که فعالیت‌های پروژه به ترتیب نزولی شاخص CWS وارد لیست P می‌شود. البته، برای شدنی‌بودن لیست اولیه P لازم است که ترتیب این لیست از نظر روابط پیش‌نیازی امکان‌پذیر باشد. برای این هدف باید قبل از وارد کردن هر فعالیت در لیست P همه پیش‌نیازهای آن وارد شده باشد. اگر ورودی روش SGS فقط لیست P باشد، زمانبندی‌های ایجادشده بیکاری‌های عمدی[۱۸] را نخواهد داشت. تخصیص بیکاری‌های عمدی به یک زمانبندی، می‌تواند باعث محافظت از زمان شروع فعالیت‌ها در مقابل تغییرات حین اجرای پروژه شود [۴]. بنابراین، ما از یک لیست بافر[۱۹] (B) نیز برای تخصیص بیکاری‌های عمدی به زمانبندی استفاده می‌کنیم. بر این اساس، هر زمانبندی از طریق روش SGS و با استفاده از لیست‌های P و B توصیف خواهد شد. یادآوری می‌شود که خروجی روش SGS یک زمانبندی شدنی است[۱۷]. عناصر لیست B به تعداد فعالیت‌های پروژه است و هر یک از آنها معرف مقدار بیکاری عمدی است که به ابتدای فعالیت مربوطه اضافه می‌شود. افزودن بیکاری‌های عمدی به ابتـــدای هر فعالیت پروژه باعث شیفت پیدا کردن فعالیت‌های پس‌نیاز آن به سمت جلو و ایجاد شناوری‌های آزاد برای فعالیت‌های پیش‌نیاز آن می‌شود.

انجام این مورد نیز لازمه شدنی بودن جواب‌ها است. یادآوری می‌شود که مقادیر اولیه همه عناصر لیست B برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

۲. ساختار تولید همسایگی:

به مجموعه زمانبندی‌هایی که در اثر انجام یک عملیات خاص روی زمانبندی x به دست می‌آید، همسایگی‌های زمانبندی x گفته می‌شود. این عملیات می‌تواند نظیر جا به جایی دو فعالیت در لیست اولویتی باشد. برای هر یک از لیست‌های P و B یک نوع مجموعه همسایگی تعریف می‌شود. هر همسایگی لیست P با جا به جایی دو عنصر متوالی آن ایجاد می‌شود. در این حالت، سایر عناصر این لیست ثابت باقی می‌ماند. قابل ذکر است که برای شدنی ماندن جواب‌ها نباید برای عناصر دارای روابط پیش‌نیازی، جا به جایی انجام گیرد. بنابراین، مجموعه همسایگی لیست P حداکثر $N-1$ عضو دارد. هر همسایگی لیست B با افزودن یک واحد بافر زمانی به یکی از عناصر آن ایجاد می‌شود. در این حالت نیز سایر عناصر این لیست ثابت باقی می‌ماند. بنابراین، مجموعه همسایگی لیست B حداکثر N عضو دارد. در این الگوریتم، مجموعه همسایگی‌ها ابتدا برای لیست P و پس از انتخاب جواب، برای لیست B ایجاد خواهد شد.

۳. روش انتخاب جواب:

برای کاهش احتمال ایجاد جواب‌های تکراری، برای لیست P یک لیست ممنوعه در نظر گرفته شده است. پس از انتخاب جواب جدید، جا به جایی مربوطه وارد این لیست می‌شود. بنابراین، هر عنصر لیست ممنوعه شامل یک جفت فعالیت است. اگر طول لیست ممنوعه برابر L باشد، با ورود عنصر $L+1$ به آن لیست، اولین عنصر آن حذف و عنصر $L+1$ به عنوان آخرین عنصر وارد لیست ممنوعه می‌شود. از بین مجموعه همسایگی لیست B، همسایگی که حداقل مقدار W_λ را داشته باشد(رابطه ۴)

www.SID.ir

Archive of SID

به عنوان جواب جدید انتخاب خواهد شد. در حالی که از بین مجموعه همسایگی مربوط به لیست P، همسایگی که حداقل مقدار W_λ را داشته باشد، به شرطی انتخاب خواهد شد که حداقل یکی از دو شرط زیر را داشته باشد:

۱. نداشتن تعلق جفت فعالیت مورد نظر به لیست ممنوعه

۲. داشتن کمترین مقدار W_λ در کل مراحل الگوریتم

در غیر این صورت، اگر هیچ یک از شرایط بالا برقرار نباشد، آنگاه این شرایط از بین سایر همسایگی‌ها برای همسایگی که حداقل مقدار W_λ را دارد، بررسی می‌شود.

۴- تنظیم عامل:

کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های فرا ابتکاری[۲۰] و بخصوص الگوریتم جستجوی ممنوعه تا حد زیادی بستگی به تنظیم عوامل دارد [۱۸]. در الگوریتم جستجوی ممنوعه باید مقادیر سه عامل تنظیم شود. این عوامل عبارتند از: طول لیست ممنوعه، تعداد اعضای یک مجموعه همسایگی و تعداد مراحل تکرار الگوریتم (شرط توقف). ما برای هر یک از این عوامل مقادیر مختلفی در نظر گرفته‌ایم که این مقادیر در جدول (۳) نشان داده شده است. در این جدول، N نشان‌دهنده‌ی تعداد فعالیت‌های پروژه و علامت [] نشان‌دهنده‌ی جزء صحیح مقادیر است.

جدول ۳: مقادیر پارامترهای الگوریتم جستجوی ممنوعه.

Parameter \ Value	Low	Medium	High
Length Of Tabu List	$[\sqrt{N}]$	$[N/2]$	N
No of members of neighborhood sets	$[\sqrt{N}]$	$[N/2]$	N
Stop criteria (no of steps without improve)	5	10	20

ما برای تعیین مقادیر مناسب این عوامل، ۱۰۰ مسئله تصادفی را با همه ترکیب‌های جدول (۳) حل کرده‌ایم. نحوه حل و تولید این مسائل در بخش ۴ گزارش شده است. بر اساس نتایج حاصله، مقادیر مناسب این عوامل به ای‌ن شکل است: (قابل ذکر است که هر یک از این نتایج با ثابت نگه داشتن مقادیر سایر عوامل به دست آمده است)

✓ افزایش طول لیست ممنوعه از $[\sqrt{N}]$ به $[N/2]$ باعث بهبود جواب‌ها شده است، ولی با افزایش آن به مقدار N، بهبود قابل توجهی حاصل نشده است. بنابراین، طول لیست ممنوعه برابر $[N/2]$ در نظر گرفته می‌شود.

✓ افزایش تعداد اعضای مجموعه همسایگی‌ها همـــواره باعث بهبود جواب‌ها شده است. بنابراین، تعداد اعضای مجموعه همسایگی لیست‌های P و B به ترتیب برابر $N-1$ و N در نظر گرفته می‌شود. یادآوری می‌شود که این مقادیر بیانگر حداکثر تعداد همسایگی ممکن برای هر لیست است.

✓ افزایش مراحل تکرار بدون بهبود از ۵ به ۱۰ اغلب باعث بهبود جواب‌ها شده است. ولی با افزایش آن به ۲۰، بهبود قابل توجهی در جواب‌ها حاصل نشده است. بنابراین شرط توقف این الگوریتم را نبود بهبود جواب‌ها در ۱۰ مرحله متوالی آن در نظر می‌گیریم.

❖ قالب کلی الگوریتم:

گام ۱) تعیین ضریب λ و لیست‌های P و B

گام ۲) محاسبه مقدار $Z_{M(0)}$ و $Z_{R(0)}$

گام ۳) ایجاد یک مجموعه همسایگی برای لیست P

گام ۴) محاسبه مقدار تابع هدف برای همه همسایگی‌ها

گام ۵) انتخاب جواب و به‌هنگام کردن لیست ممنوعه

گام ۶) ایجاد یک مجموعه همسایگی برای لیست B

گام ۷) محاسبه مقدار تابع هدف برای کلیه همسایگی‌ها

گام ۸) انتخاب جواب

گام ۹) اگر شرط توقف برآورده نشد، حرکت به گام ۳

گام ۱۰) انتخاب بهترین جواب

روش تعیین مقادیر λ در بخش بعدی، گزارش شده است. این الگوریتم به ازای جمیع مقادیر λ اجرا شده و با حذف جواب‌های مغلوب[۲۱] از مجموعه جواب‌های به دست آمده، مجموعه‌ای از جواب‌های کارا ایجاد می‌شود.

آزمایش‌های محاسباتی و تحلیل نتایج

- تولید مسائل مناسب

الگوریتم مطرح‌شده به وسیله زبان برنامه‌نویسی C# کدنویسی شده است. بدین روش، حل مسائل زمانبندی پروژه با استفاده از یک کامپیوتر شخصی Pentium IV با پردازشگر ۳/۲ گیگا هرتز انجام گرفته است. همه مسائل مورد آزمایش در این مقاله به طور تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار RANGEN II که یکی از کاراترین نرم‌افزارهای تولید مسائل زمانبندی پروژه است، ایجاد شده است [۱۹].

www.SID.ir

Archive of SID

در این نرم‌افزار، امکان تعیین مقادیر چندین عامل پروژه وجود دارد. برخی از این عوامل مربوط به منابع و برخی دیگر مربوط به ساختار شبکه پروژه است. عوامل اصلی این نرم‌افزار عبارتند از: تعداد فعالیت‌های پروژه، فشردگی روابط پیش‌نیازی، فاکتور منابع[۲۲] و محدودیت منابع[۲۳]. به جز عامل اول، مقادیر سایر عوامل بین صفر و یک است. هر چه مقدار عامل فشردگی روابط پیش‌نیازی بزرگ‌تر باشد، ارتباط بین فعالیت‌های پروژه بیشتر و در نتیجه امکان اجرای موازی آنها کمتر خواهد بود. همچنین، هر چه مقدار عامل فاکتور منابع بزرگ‌تر باشد، تنوع منابع مورد استفاده در فعالیت‌ها بیشتر خواهد بود. برای مثال اگر مقدار این عامل برای یک پروژه برابر ۰/۵ باشد، آنگاه برای اجرای هر یک از فعالیت‌ها به طور متوسط نیمی از انواع منابع به‌کار برده خواهد شد. از سوی دیگر، هر چه مقدار عامل محدودیت منابع بزرگ‌تر باشد، متوسط استفاده هر نوع منبع برای اجرای هر یک از فعالیت‌ها بیشتر خواهد بود. برای انجام آزمایش‌های محاسباتی، مقادیر مختلفی برای هر یک از این عوامل در نظر گرفته شده است که این مقادیر در جدول (۴) نشان داده شده است. هدف از این کار، حفظ تنوع مسائل و ایجاد انواع پروژه‌ها با ساختارهای متفاوت است. اعداد درون پرانتز بیانگر کد مربوط به مقدار هر عامل است. از آنجا که برای هر یک از عوامل سه مقدار مختلف در نظر گفته شده است، با ترکیب همه مقادیر می‌توان ۸۱ نوع مسئله مختلف تولید کرد. شماره هر نوع مسئله از روش جمع کدهای مربوط به مقادیر عوامل آن به‌دست می‌آید. برای مثال شماره مسئله‌ای که همه عوامل آن مقدار متوسطی دارد، ۴۱ است. قابل ذکر است که شماره مسائل در بخش بعدی به منظور تحلیل نتایج استفاده خواهد شد.

جدول ۴: مقادیرعوامل پروژه در RANGEN II.

Parameter \ Value	Low	Medium	High
No of activity	30(1)	60(28)	120(55)
Complexity of predecessor relations	0.2(0)	0.5(9)	0.8(18)
resource factor	0.5(0)	0.75(3)	1(6)
resource constrainedness	0.3(0)	0.5(1)	0.7(2)

در این مقاله برای هر نوع مسئله، ۱۰ مسئله تصادفی تولید شده است. بنابراین، در مجموع ۸۱۰ مسئله مورد آزمایش قرار می‌گیرد. تولید این مسائل با ۴ نوع منبع تجدیدشدنی و با سطح دسترسی ۱۰ واحد در طول زمان انجام گرفته است. وزن دیرکرد همه فعالیت‌ها یکسان و برابر واحد در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که موعد تحویل هر پروژه برابر $[1.3Z_M^{best}]$ در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. Z_M^{best} معرف کمترین زمان ختم پروژه است که این مقدار از راه حل مسئله با ضریب $\lambda = 1$ به دست می‌آید. همه مسائل علاوه بر تابع جانشین جدید با استفاده از تابع جانشین مقاله الفازان [۱۴] نیز حل می‌شود. مقایسه عملکرد این دو تابع با استفاده از آزمایش‌های شبیه‌سازی انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن نبود قطعیت زمان اجرای فعالیت‌ها انجام گرفته است. احتمال افزایش زمان اجرای هر فعالیت پروژه برابر ۰/۱ و مقدار افزایش آن برابر جزء صحیح درصدی تصادفی از زمان اجرای آن فعالیت در نظر گرفته شده است. برای جواب مربوط به هر تابع جانشین به ازای هر مقدار λ، ۱۰۰ بار شبیه‌سازی صورت گرفته است. مقادیر مختلف λ به شکل رابطه‌ی ۵ است.

$$\lambda = 1 - 0.05j \quad , j \in \{0,1,...,9\} \qquad (۵)$$

- تحلیل نتایج

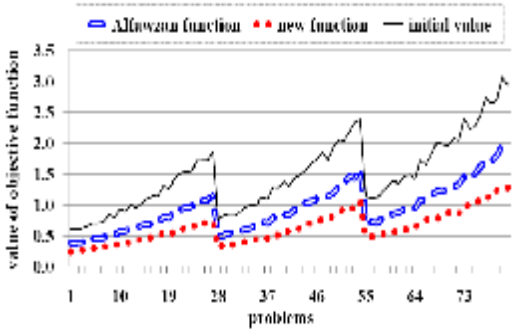
مسائل مورد آزمایش در این مقاله به ترتیب شماره، حل و شبیه‌سازی شده است. یادآوری می‌شود که برای هر مسئله، با استفاده از هر یک از توابع جانشین یک جواب به‌دست می‌آید که هر یک از این جواب‌ها با دو معیار مقاومت شبیه‌سازی می‌شود. در صورت ثابت ماندن سایر عوامل پروژه، هر چه تعداد فعالیت‌ها بیشتر باشد احتمال اختلال در زمانبندی بیشتر خواهد بود. از این رو، مقادیر توابع مربوط به معیارهای مقاومت به طور نسبی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، مقادیر توابع هدف مربوط به معیارهای مقاومت برای هر پروژه بر تعداد فعالیت‌های آن تقسیم می‌شود. در این آزمایش‌ها برای هر مسئله، مقادیر تابع هدف به ازای جواب اولیه نیز به دست آمده است. بدین روش، میزان کارایی الگوریتم جستجوی ممنوعه ارزیابی می‌شود.

با استفاده از نتایج نشان داده شده در شکل (۴)، عملکرد تابع جانشین مقاله الفازان و تابع جانشین جدید

www.SID.ir

Archive of SID

در معیار مقاومت جواب مقایسه می‌شود. این نمودار بیانگر متوسط مقدار نسبی رابطه ۱ برای مسائل مختلف و به ازای همه مقادیر λ است. همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، الگوریتم ما با استفاده از هر دو تابع جانشین منجر به بهبود جواب از نظر معیار مقاومت جواب می‌شود. البته، تابع جدید همواره جانشین بهتری برای این معیار است. در صورت حل مسائل با استفاده از تابع جانشین جدید، این الگوریتم به طور متوسط منجر به ۱۳۷درصد بهبود نسبت به جواب اولیه شده است. این مقدار با استفاده از تابع جانشین الفازان برابر با ۵۷درصد است. با توجه به شماره مسائل، اختلاف عملکرد دو تابع جانشین با افزایش مقدار عوامل اغلب افزایش یافته است. در این نمودار، دو کاهش آنی در نقاط تغییر تعداد فعالیت‌ها وجود دارد. این مورد به دلیل کاهش مقدار سایر عوامل پروژه به وجود آمده است. نشان داده می‌شود که مقدار عوامل به ازای هر دو تابع جانشین در معیار مقاومت جواب تأثیرگذار است. این مورد را بدین شکل نیز می‌توان توجیه کرد که با افزایش مقدار عوامل امکان زمانبندی موازی فعالیت‌ها کاهش می‌یابد؛ از این رو افزایش زمان اجرای فعالیت‌ها با احتمال بیشتری منجر به اختلال در فعالیت‌های پس‌نیاز خواهد شد.

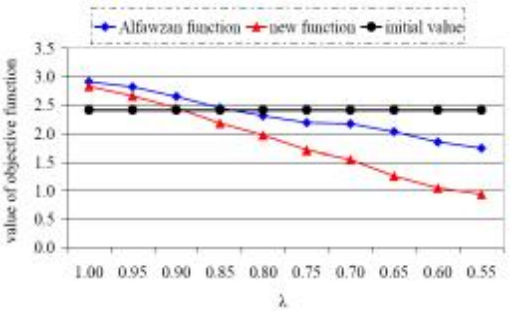


شکل ۴: عملکرد دو تابع جانشین در معیار مقاومت جواب.

با استفاده از نتایج نشان‌داده‌شده در شکل ۵، عملکرد تابع جانشین مقاله الفازان و تابع جانشین جدید در معیار مقاومت کیفی مقایسه می‌شود. متوسط مقدار تابع هدف در اغلب مسائل برای هر دو تابع جانشین به طور تقریبی یکسان است. بنابراین تابع جدید به عنوان جانشین معیار مقاومت کیفی، برتری چندانی نسبت به تابع الفازان ندارد. جالب است که الگوریتم ما باعث تضعیف جواب‌ها از نظر معیار مقاومت کیفی نسبت به جواب اولیه شده است. این مورد به دلیل تخصیص بیکاری‌های عمدی به وجود آمده است. چرا که، وجود بافرهای زمانی بین فعالیت‌ها باعث به تعویق افتادن زمان ختم پروژه و در نتیجه افزایش احتمال تجاوز از موعد تحویل آن می‌شود.

شکل ۵: عملکرد دو تابع جانشین در معیار مقاومت کیفی.

با استفاده از نتایج نشان‌داده‌شده در شکل (۶)، عملکرد دو تابع جانشین در معیار مقاومت جواب بر اساس ضریب λ مقایسه می‌شود. به ازای هر مقدار λ تابع جدید همواره جانشین بهتری برای معیار مقاومت جواب است. همچنین، اختلاف عملکرد دو تابع جانشین با کاهش مقدار λ افزایش می‌یابد. بدین معنا که هر چه اهمیت معیار مقاومت جواب بیشتر باشد، تفاوت این دو تابع چشم‌گیرتر است. ضریب λ به ازای هر دو تابع جانشین در معیار مقاومت جواب تأثیرگذار است. این مورد را بدین صورت می‌توان توجیه کرد که با کاهش مقدار λ امکان تخصیص بافرهای زمانی بیشتر شده و در نتیجه زمان شروع فعالیت‌ها کمتر دچار اختلال می‌شود. جالب است که برای مقادیر بالای λ، الگوریتم باعث تضعیف جواب‌ها از نظر معیار مقاومت جواب شده است، در حالی که کارایی آن با کاهش مقدار λ افزایش می‌یابد.

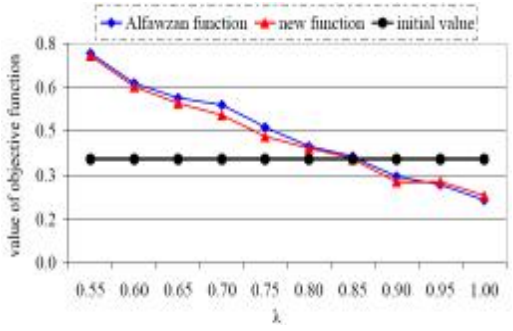


شکل ۶: عملکرد دو تابع جانشین در معیار مقاومت جواب بر اساس ضریب λ.

www.SID.ir

Archive of SID

با استفاده از نتایج نشان‌داده‌شده در شکل (۷)، عملکرد دو تابع جانشین در معیار مقاومت کیفی بر اساس ضریب λ مقایسه می‌شود. مشاهده می‌کنید که به ازای هر مقدار λ متوسط مقدار تابع هدف در اغلب مسائل به طور تقریبی یکسان است. در این نمودار نیز نشان داده می‌شود که تابع جدید به عنوان جانشین معیار مقاومت کیفی، برتری چندانی نسبت به تابع الفازان ندارد. مشاهده می‌کنید که با افزایش مقدار λ مقادیر مربوط به معیار مقاومت کیفی بهبود می‌یابد. در حالی که افزایش ضریب λ بیانگر اهمیت بیشتر برای زمان ختم پروژه و اهمیت کمتر برای معیار مقاومت کیفی است. این تضاد را بدین صورت می‌توان توجیه کرد که با افزایش مقدار λ امکان تخصیص بافرهای زمانی کمتر و در نتیجه زمان ختم زمانبندی کوتاه‌تر می‌شود. برای مقادیر بزرگ λ، الگوریتم ما باعث بهبود جواب‌ها از نظر معیار مقاومت کیفی می‌شود. البته، کارایی آن با کاهش مقدار λ کاهش می‌یابد.



شکل ۷: عملکرد دو تابع جانشین در معیار مقاومت کیفی بر اساس ضریب λ.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در یک مسئله، استفاده از توابع جانشین مختلف برای معیار مقاومت می‌تواند منجر به کسب جواب‌هایی با مقاومت متفاوت شود؛ در حالی که زمان ختم این جواب‌ها تفاوت چندانی با هم ندارد. حداکثر اختلاف زمان ختم در کلیه مسائل و ضرایب مختلف λ برابر ۴درصد است.

جمع‌بندی

در این مقاله، یک مدل دوهدفه برای مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع در نظر گرفته شده است. مقاومت زمانبندی و زمان ختم پروژه به عنوان دو هدف این مدل مطرح است. برای حل مدل، یک تابع جانشین جدید برای معیارهای مقاومت توسعه داده شده است. همچنین، یک الگوریتم جستجوی ممنوعه نیز برای ایجاد مجموعه جواب‌های کارای مدل توسعه داده شد. پس از کدنویسی الگوریتم، تعداد زیادی مسئله تصادفی با استفاده از آن حل شده است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم و توابع جانشین مقاومت، آزمایش‌های محاسباتی گسترده‌ای با استفاده از شبیه‌سازی انجام گرفته است. نشان داده شد که تابع جانشین جدید در معیار مقاومت جواب بر تابع الفازان چیرگی داشته و نیز با کاهش ضریب λ این چیرگی افزایش می‌یابد. اگر چه، در معیار مقاومت کیفی بهبود قابل توجهی حاصل نشده است.بنابراین، با توجه به معیار مقاومت جواب استفاده از تابع جانشین جدید قابل دفاع است. همچنین، تخصیص بافرهای زمانی به فعالیت‌ها می‌تواند منجر به بهبود زمانبندی از لحاظ معیار مقاومت جواب شود، ولی این کار سبب تضعیف زمانبندی از نظر معیار مقاومت کیفی خواهد شد.

این مورد بر نتایج حاصل از رویکرد CC/BM نیز صحه می‌گذارد. بنابراین، این الگوریتم برای معیار مقاومت کیفی غیرکارا و برای معیار مقاومت جواب کارا است. توسعه سایر توابع جانشین برای معیارهای مقاومت می‌تواند یک موضوع تحقیقاتی جالب برای آینده باشد.

مراجع

1- Demeulemeester, E. and Herroelen, W. (2002). *Project Scheduling: A Research Handbook*. Kluwer Academic Publishers, Boston.

2- Herroelen, W., Demeulemeester, E. and De Reyck, B. (1998). "Resource constrained project scheduling: A survey of recent developments." *Computers and Operation Research*., Vol. 25, No. 4, PP. 279-302.

3- Herroelen, W. and Leus, R. (2005). "Project scheduling under uncertainty: survey and research potentials." European *Journal of Operational Research*., Vol. 165, PP. 289-306.

www.SID.ir

Archive of SID

4- Leus, R. (2003). *The generation of stable project plans*. Ph.D. Dissertation, Department of Applied Economics, Katholieke Universities Leuven, Belgium.

5- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W. and Leus, R. (2005). "The trade off between stability and makespan in resource constrained project scheduling." *International Journal of Production Research*., Vol. 44, No. 2, PP. 215-236.

6- Goldratt, E. M. (1997). *Critical chain*. The North River Press Publishing Corporation, Great Barrington.

7- Herroelen, W. and Leus, R. (2001). "On the merits and pitfalls of critical chain scheduling." *Journal of* Operations *Management*., Vol. 19, PP. 559-577.

8- Herroelen, W. and Leus, R. (2004). "The construction of stable baseline schedules." *European Journal of* Operational *Research*., Vol. 156, PP. 550-565.

9- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W. and Leus, R. (2005). "The use of buffers in project management: The trade off between stability and Makespan." *International Journal of Production Economics*., Vol. 97, PP. 227-240.

10- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W. and Leus, R. (2006). "The trade off between stability and makespan in resource constrained project scheduling." *International Journal of Production Research*., Vol. 44, No. 2, PP. 215-236.

11- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E. and Herroelen, W. (2008). "Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis." *European Journal of Operational Research*., Vol. 189, No. 3, PP. 723-733.

12- Lambrechts, O., Demeulemeester, E. and Herroelen, W. (2008). "Proactive and reactive strategies for resource constrained project scheduling with uncertain resource availabilities." *Journal of scheduling*., Vol. 11, No. 2, PP. 121-136.

13- Lambrechts, O., Demeulemeester, E. and Herroelen, W. (2008). "A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules." *International Journal of Production Economics*., Vol. 111, No. 2, PP. 493-508.

14- Al-Fawzan, M. A. and Haouari, M. (2005). "A bi-objective model for robust resource constrained project scheduling." International *Journal of Production Economics*., Vol. 96, PP. 175-187.

15- Kobylanski, P. and Kuchta, D. (2007). "A note on the paper by M. A. Al-Fawzan and M. Haouari about a bi-objective problem for robust resource constrained project scheduling." *International Journal of Production Economics*., Vol. 107, No. 2, PP. 496-501.

16- Ringuest, J. L. (1992). *Multi objective optimization: Behavioral and Computational Considerations*. Kluwer Academic publishers.

17- Kolisch, R. and Hartmann, S. (2006). "Experimental investigation of heuristics for resource constrained project scheduling: An update." *European Journal of Operational Research.*, Vol. 174, PP. 23-37.

18- Glover, F. and Laguna, M. (1993). *Tabu search in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial* Problems. C. R. Reeves Ed London: Blackwell Sciatic.

www.SID.ir

Archive of SID

19- Vanhoucke, M., Coelho, J., Debels, D., Maenhout, B. and Tavares, L. V. (2008). "An evaluation of the adequacy of project network generators with systematically sampled networks." *European Journal of Operational Research*., Vol. 187, PP. 511-524.

واژه‌های انگلیسی به‌ترتیب استفاده در متن

1- Resource constrained Project Scheduling Problem
2- Proactive / Robust Scheduling
3- Bi-Objective Model
4- Surrogate Functions
5- Tabu Search Algorithm
6- Efficient Solutions
7- Quality Robustness
8- Solution Robustness
9- Critical Chain and Buffer Management
10- Just in Case
11- Free Float
12- Cumulative Weight of Successors
13- Neighborhoods Search
14- Local Optimum
15- Tabu List
16- Schedule Generation Scheme
17- Priority List Representation
18- Idle Insert
19- Buffer List
20- Meta Heuristics
21- Dominated Solutions
22- Resource Factor
23- Resource Constrainednes

www.SID.ir