توسعه مدل زمانبندي پروژه با اهداف زمان ختم و مقاومت زمانبندي

ايمان بساق‌زاده[۱]، سيدرضا حجازي[*۲] و اميرموسي احسان[۳]

[۱] دانش آموخته کارشناسي ارشد، دانشکده مهندسي صنايع و سيستم‌ها، دانشگاه صنعتي اصفهان

[۲] دانشيار، دانشکده مهندسي صنايع و سيستم‌ها، دانشگاه صنعتي اصفهان

[۳] دانش آموخته کارشناسي ارشد، دانشکده کامپيوتر، دانشگاه صنعتي شريف

(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 پـروژه اغلب در پایبندی به تعهداتشان دچار مشکل می‌شوند. بنابراین زمانبندی پروژه علاوه بر زمان ختم کوتاه باید حین اجرا دچار کمتـرین اخـتلال شود. در این مقاله پس از بیان مفهوم مقاومت زمانبندی، یک مدل زمانبندی پروژه با اهداف کمینه کردن زمـان خـتم پـروژه و بیشـینه کـردن مقاومت زمانبندی، توسعه داده می‌شود. در این مدل، دو تابع جانشین که یکی مربوط به ادبیات موضوع و دیگری جدید است، به‌منظـور هـدف مقاومت به کار گرفته شده است. همچنین، یک الگوریتم جستجوی ممنوعه برای تولید جواب‌های کارا توسعه داده شده است که بـا اسـتفاده 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.

واژه‌هاي کليدي: زمانبندي پروژه، عدم قطعيت، مقاومت زمانبندي، توابع هدف جانشين

مقدمه

زمانبندي، يکي از مسائل مهم در مرحله برنامه‌ريزي پروژه است. زمانبندي پروژه عبارت است از تعيين زمان شروع هر يک از فعاليت‌هاي پروژه با توجه به محدوديت‌ها و به منظور رسيدن به يک يا چند هدف مشخص [۱]. با استفاده از زمانبندي پروژه، مواردي همچون تخصيص منابع به فعاليت‌ها، تعهدات پيمانکاران، تعميرات پيش‌گيرانه و تحويل سفارش به مشتري داخلي يا خارجي به راحتي قابل برنامه‌ريزي و کنترل خواهد بود. در سال‌هاي اخير تحقيقات گسترده‌اي روي موضوع زمانبندي پروژه انجام شده است. بيشتر تحقيقات انجام شده با فرض دسترسي به اطلاعات کامل و وجود يک مسئله قطعي انجام گرفته است. يکي از اشکال‌های اساسي مدل‌هاي قطعي زمانبندي پروژه اين است که در آنها فرض مي‌شود فعاليت‌ها در يک شرايط ايده‌آل انجام مي‌گيرد و زمانبندي ارائه‌شده مي‌تواند به طور دقيق مطابق با برنامه اجرا شود. اگر چه در عمل، وجود چندين عامل کنترل نشدني نظير افزايش زمان اجراي فعاليت‌ها، نبود دسترسي به منابع، اضافه شدن فعاليت‌هاي پيش‌بيني نشده به پروژه، شرايط بد آب و هوايي و غيره، ممکن است منجر به ايجاد اختلال‌هایی در زمانبندي پروژه شود. اين اختلال‌ها مي‌تواند هزينه‌هاي قابل توجـهي به سيســتم پروژه تحميل کند.

يکي از مهم‌ترين مسائل در بحث زمانبندي پروژه مدل RCPSP [۱] است. از زمان پيدايش اين مدل در سال ۱۹۶۹ تا کنون مطالعات بسياري روي آن انجام شده است [۲]. محدوديت‌هاي اصلي اين مدل شامل سطح دسترسي به منابع و روابط پيش‌نيازي بين فعاليت‌هاي پروژه است. همچنين، تابع هدف آن اغلب کمينه کردن زمان ختم پروژه است. همه‌ی عوامل اين مدل که جزء دسته مسائل NP-Hard است، به طور قطعي است. قطعيت عوامل پروژه يک فرض اساسي در مدل RCPSP است؛ در حالي که استفاده از مقادير قطعي در ايجاد يك زمانبندي، مي‌تواند مشکلاتي را حين اجراي پروژه به وجود آورد. چه بسا قبل از شروع پروژه يک زمانبندي بهينه با استفاده از مقادير قطعي ايجاد شود، ولي آن زمانبندي در حين اجرا به دليل نبود قطعيت عوامل پروژه بارها، دچار اختلال شود. در اين حالت براي تابع هدف مورد نظر که در ابتدا بهينه شده بود، در عمل يک مقدار ضعيف و دور از انتظار به دست مي‌آيد. از اين رو، اعتبار زمانبندي‌هاي قطعي اغلب زير سؤال مي‌رود. در سال‌هاي اخير براي مواجهه با

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

نبود قطعيت عوامل يك مسئله زمانبندي، چندين رويكرد جديد توسعه داده شده است. در ابتدا، همه اين رويكردها كم و بيش در مسئله زمانبندي كارها روي يک ماشين بررسي شده است. به تازگی، دامنه بحث برخي از آنها به مسئله زمانبندي پروژه نيز كشيده شده است [۳]. رويكرد زمانبندي مقاوم[۲] يكي از جديدترين رويكردهاي مواجهه با نبود قطعيت عوامل پروژه است. با استفاده از اين رويكرد مي‌توان زمانبندي را به نحوي ايجاد كرد كه تغيير مقادير عوامل حين اجراي پروژه تا آنجا كه ممكن است منجر به اختلال در زمانبندي نشود.

در اين مقاله، يك مدل دوهدفه[۳] براي RCPSP توسعه داده شده است. اهداف اين مدل عبارتند از بيشينه كردن مقاومت زمانبندي و كمينه كردن زمان ختم پروژه. هدف از اين كار اين است كه زمانبندي پروژه، علاوه بر زمان ختم كوتاه در مقابل تغييرات و عوامل پيش‌بيني نشده دچار كمترين اختلال شود. در ادامه اين مقاله ابتدا مفهوم رويكرد زمانبندي مقاوم و انواع آن بيان شده است. سپس مروري بر تحقيقات قبلي مربوط به رويكرد زمانبندي مقاوم در پروژه انجام گرفته است. پس از توسعه يك تابع جانشين[۴] جديد براي معيارهاي مقاومت، يک مدل دوهدفه برای توليد زمانبندي‌هاي كوتاه و در عين حال مقاوم توسعه داده شده است. سپس يک الگوريتم جستجوي ممنوعه[۵] نيز براي توليد جواب‌هاي كاراي[۶] اين مدل توسعه داده می‌شود. برای ارزيابي عملكرد اين الگوريتم و توابع جانشين مقاومت، آزمايش‌های محاسباتي گسترده‌اي با استفاده از شبيه‌سازي انجام گرفته است. در نهايت جمع‌بندي اين مقاله در بخش پاياني آن انجام مي-گيرد.

مروري بر مفهوم و تحقيقات زمانبندي مقاوم

- مفهوم رويكرد زمانبندي مقاوم و انواع آن

براي هر مسئله‌ی برنامه‌ريزي، به جوابي مقاوم مي‌گويند كه تغييرات جزيي مقادير عوامل، تأثير قابل توجهي در مقدار اوليه تابع هدف نداشته باشد و جواب اوليه همچنان يک جواب قابل قبول باقي بماند [۴]. در رويكرد زمانبندي مقاوم با پيش‌بيني تغييراتي كه حين اجراي پروژه به‌وجود مي‌آيد، يک زمانبندي مقاوم ايجاد مي‌شود. بدين منظور مي‌توان از اطلاعات مربوط به ويژگي‌هاي تغييرات، نظير توزيع احتمال عوامل غيرقطعي استفاده كرد. در رويكرد زمانبندي مقاوم دو نوع تابع هدف (معيار) مطرح است[۵]:

۱. معيار مقاومت كيفي[۷]: با استفاده از اين معيار، زمانبندي به نحوي ايجاد مي‌شود كه تغيير عوامل تا آنجا كه ممكن است مانع تجاوز زمان ختم واقعي پروژه از موعد تحويل آن شود. تابع هدف مربوط به اين معيار به شكل كمينه‌كردن زمان ختم واقعي پروژه است كه يك متغير غير قطعي است. كاهش مقدار اين تابع براي يك پروژه به منزله افزايش مقاومت كيفي است. يكي از مهم‌ترين كارهاي تحقيقاتي در اين زمينه، رويكرد زنجيره بحراني است كه در سال ۱۹۹۷ توسط گلدرات ارائه شد [۶].

۲. معيار مقاومت جواب[۸]: با استفاده از اين معيار، زمانبندي به نحوي ايجاد مي‌شود كه تغيير عوامل تا آنجا كه ممكن است مانع انحراف زمان شروع واقعي فعاليت‌ها از زمان شروع برنامه‌ريزي شده‌ی آنها شود. تابع هدف مربوط به اين معيار براي يك پروژه با N فعاليت، به صورت كمينه كردن رابطه ۱ است.

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

در اين رابطه، متغيرهاي s_j و S_j به ترتيب نشان‌دهنده زمان شروع برنامه‌ريزي شده و واقعي فعاليت j است. اگر $S_j > s_j$ باشد، آنگاه w_j معرف وزن تأخير و در غير اين صورت معرف وزن تعجيل فعاليت j است. قابل ذكر است كه S_j يك متغير غيرقطعي است. كاهش مقدار رابطه ۱ براي يك پروژه به منزله افزايش مقاومت جواب است. اولين كار تحقيقاتي مهم در اين زمينه در سال ۲۰۰۳ توسط لوبيز ارائه شد [۴].

به‌كارگيري معيار مقاومت كيفي براي مديران پروژه اغلب كارا است، چرا كه براي آنها مطلوب است كه زمان ختم واقعي پروژه نسبت به موعد تحويل آن افزايش قابل توجهي نداشته باشد. از سوي ديگر، ممكن است شرايط بعضي از پروژه‌ها به‌گونه‌اي باشد كه در صورت به وجود آمدن انحراف در زمان شروع برخي از فعاليت‌ها، هزينه قابل توجهي به سيستم پروژه تحميل شود. در اين شرايط، به‌كارگيري معيار مقاومت جواب بسيار مطلوب خواهد بود. برای مثال استفاده از اين معيار در زمانبندي حركت قطارها و هواپيماها، مسابقات ورزشي و كنفرانس‌ها بسيار مطلوب‌تر از كمينه كردن يا محافظت از زمان ختم پروژه است.

- مروري بر تحقيقات زمانبندي مقاوم

از آنجا که رویکرد زمانبندي مقاوم، یک مقوله‌ی جدید در بحث زمانبندي 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 اصلي این رویکرد، ایجاد زمانبندي مقاوم در حالت نبود قطعیت زمان اجراي فعالیت‌ها و با معیار مقاومت کیفي است. در این رویکرد با استفاده از مفهوم زنجیره‌ها و به کمك بافرها يك زمانبندي مقاوم ایجاد می‌شود [۶]. هرولن در سال ۲۰۰۱ به بررسي نقاط قوت و ضعف رویکرد CC/BM پرداخته است [۷]. وي در سال ۲۰۰۴ نیز یکي از اولین مقالات مهم در رابطه با زمانبندي پروژه بدون محدودیت منابع و با معیار مقاومت جواب را ارائه کرده است [۸]. فرض اساسي این مقاله، وجود سناریوهاي "فقط یک تغییر"[10] در حالت نبود قطعیت زمان اجراي فعالیت‌ها است؛ بدین معنا که در طول اجراي پروژه فقط زمان اجراي یک فعالیت دچار تغییر مي‌شود. فاندوندر و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به موازنه معیارهاي مقاومت کیفي و مقاومت جواب پرداخته‌اند[۹]. در مدل آنها، زمانبندي پروژه بدون محدودیت منابع و زمان اجراي فعالیت‌ها غیرقطعي در نظر گرفته شده است. در این مقاله، آزمایش‌های گسترده‌اي از طریق شبیه‌سازي انجام شده است. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسي این موضوع است که در چه شرایطي از زمان تحویل پروژه و در چه شرایطي از زمان شروع سایر فعالیت‌هاي پروژه باید محافظت شود. فاندوندر و همکارانش در سال ۲۰۰۶ این آزمایش‌ها را براي مدل زمانبندي پروژه با محدودیت منابع نیز انجام داده‌اند [۱۰]. آنها در سال ۲۰۰۸ نیز چند الگوریتم ابتکاري به منظور ایجاد زمانبندي مقاوم در حالت نبود قطعیت زمان اجراي فعالیت‌هاي پروژه و با معیار مقاومت جواب ارائه کرده‌اند [۱۱]. لمبریج و همکارانش در سال ۲۰۰۸ براي اولین بار رویکردي را مطرح کردند که براي ایجاد زمانبندي مقاوم به جاي زمان اجراي فعالیت‌هاي پروژه، عامل سطح دسترسي به منابع غیرقطعي در نظر گرفته مي‌شود [۱۲-۱۳]. در این رویکرد هر منبع مي‌تواند دچار از کارافتادگي‌هاي پیش‌بیني نشده شود. هدف مقاله آنها، ایجاد زمانبندي مقاوم با معیار مقاومت جواب است. الفازان در سال ۲۰۰۵ معیارهاي زمان ختم و مقاومت را با هم به عنوان اهداف RCPSP در نظر گرفته است [۱۴]. در این مقاله از مجموع شناوري آزاد[11] فعالیت‌ها به عنوان تابع جانشین معیار مقاومت استفاده شده است. کابیلانسکي در سال ۲۰۰۷ مقاله الفازان را بررسي و نقاط ضعف آن را بیان کرده‌اند [۱۵]. اکنون در این مقاله پس از رفع اشکالات اساسي وارد بر مقاله الفازان، يك الگوریتم جستجوي ممنوعه براي تولید مجموعه جواب‌هاي کارا توسعه داده مي‌شود.

توسعه مدل زمانبندي پروژه و روش حل آن

- توابع جانشین معیارهاي مقاومت

در صورت غیرقطعي بودن عوامل پروژه، زمان شروع واقعي فعالیت‌ها نیز غیرقطعي خواهد بود. از این رو، محاسبه مقدار توابع مربوط به معیارهاي مقاومت بسیار پیچیده است[۴]. یکي از راه‌هاي مناسب براي حل مسائلي با توابع هدف پیچیده این است که به جاي تابع هدف اصلي از یک تابع هدف جانشین استفاده شود. مهم‌ترین ویژگي توابع هدف جانشین، سادگي محاسبه مقدار آنها است. یک تابع هدف جانشین مناسب باید معادل و هم‌سو با معیار اصلي مسئله باشد. به عبارت دیگر، اگر مقدار تابع هدف اصلي یک مسئله به ازاي 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 محاسباتي آن را کاهش مي‌دهد. الفازان براي معیار مقاومت از مجموع شناوري آزاد فعالیت‌ها به عنوان یک تابع جانشین استفاده کرده است[۱۴]. شناوري آزاد يك فعالیت در زمان‌بندي S به معني مقدار زماني است که آن فعالیت در زمان‌بندي S مي‌تواند به تأخیر بیافتد، بدون اینکه تأثیري در زمان شروع سایر فعالیت‌ها داشته باشد [۱]. اختلال در هر یک از فعالیت‌هاي پیش‌نیاز مي‌تواند منجر به تأخیر در زمان شروع فعالیت‌هاي پس‌نیاز شود. اگر يك فعالیت شناوري آزاد داشته باشد، فعالیت‌هاي پس‌نیاز آن با احتمال کمتري به تعویق خواهد افتاد.

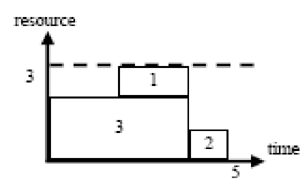
مقاله الفازان دو اشکال اساسي دارد. اولین اشکال آن، گنگ بودن نوع معیار مقاومت است. در مقاله الفازان به طور صریح اشاره نشده است که مجموع شناوري آزاد فعالیت‌ها، جانشین کدام معیار مقاومت است. به عبارت دیگر، مشخص نیست که منظور آن معیار مقاومت کیفي است یا مقاومت جواب. دومین و مهم‌ترین اشکال مقاله

الفازان مربوط به نامناسب بودن تابع جانشين مقاومت است. نشان داده شده است که مجموع شناوري آزاد فعاليت‌هاي پروژه، جانشين مناسبي براي هيچ يک از معيارهاي مقاومت کيفي و مقاومت جواب نيست[۱۵].

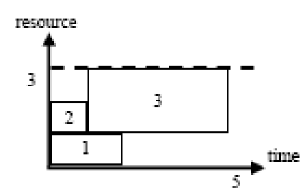
در اينجا با استفاده از يک مثال نشان داده مي‌شود که مجموع شناوري آزاد فعاليت‌ها نمي‌تواند جانشين مناسبي براي معيار مقاومت باشد. يک پروژه را با ۳ فعاليت و با موعد تحويل ۵ واحد زماني در نظر بگيريد. فرض کنيد که اين فعاليت‌ها هيچگونه رابطه پيش‌نيازي با يکديگر ندارند و تنها از يک نوع منبع تجديدشدني استفاده مي‌کنند. ميزان دسترسي به اين منبع برابر ۳ واحد در طول زمان است. در جدول (۱)، زمان اجرا و مقدار استفاده از منبع در هر واحد زماني براي هر يك از فعاليت‌ها نشان داده شده است. در شکل‌هاي (۱) و (۲) نيز دو زمانبندي شدني براي اين پروژه ارائه شده است.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به فعاليت‌هاي پروژه مثال.

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



شکل ۱: زمانبندي ۱.



شکل ۲: زمانبندي ۲.

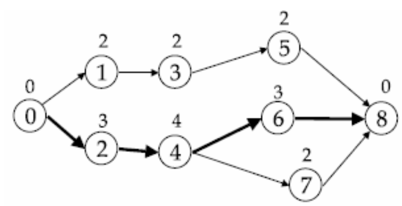
مجموع شناوري‌هاي آزاد در زمانبندي ۱ برابر ۲ واحد است که مربوط به فعاليت‌هاي ۱ و۳ است. در حالي که اين مقدار براي زمانبندي ۲ برابر ۳ واحد است که همگی مربوط به فعاليت ۱ است. فرض کنيد که تنها عامل غيرقطعي اين مسئله زمان اجراي فعاليت‌ها است و اين عامل در صورت تغيير، يک واحد افزايش مي‌يابد. اگر در عمل احتمال افزايش زمان اجراي تمام فعاليت‌ها برابر باشد، آنگاه احتمال تجاوز زمان ختم واقعي پروژه از موعد تحويل آن براي زمانبندي ۱ کمتر از زمانبندي ۲ است. بنابراين از نظر معيار مقاومت کيفي، زمانبندي ۱ مقاوم‌تر از زمانبندي ۲ است؛ اگر چه مجموع شناوري‌هاي زمانبندي ۱ کوچك‌تر است. اگر فرض کنيم که وزن تأخير همه فعاليت‌ها برابر باشد، واضح است که اميد رياضي تابع مقاومت جواب (رابطه ۱) براي زمانبندي ۱ کوچك‌تر از زمانبندي ۲ است. بنابراين، از نظر معيار مقاومت جواب نيز زمانبندي ۱ مقاوم‌تر است. بنابراين، نشان داديم که تابع مجموع شناوري آزاد فعاليت‌ها، نمي‌تواند جانشين مناسبي براي هيچ يك از معيارهاي مقاومت باشد. دليل عمده اين نقيصه، توجه نکردن اين تابع به نحوه تخصيص شناوري‌ها است. در اينجا با اصلاح نحوه تخصيص شناوري‌ها، يك تابع جانشين جديد براي معيارهاي مقاومت توسعه داده شده است.

در تابع مجموع شناوري آزاد فعاليت‌ها به عنوان جانشين معيارهاي مقاومت، اهميت شناوري براي همه فعاليت‌هاي پروژه يکسان در نظر گرفته مي‌شود. در حالي که تخصيص شناوري‌ها به فعاليتي که پس‌نيازهاي آن هزينه ديرکرد بيشتري داشته باشد، مطلوبيت بيشتري خواهد داشت. چرا که، افزايش زمان اجراي اين گونه فعاليت‌ها اثر بيشتري بر توابع مربوط به معيارهاي مقاومت دارد. بنابراين براي تخصيص شناوري‌ها، فعاليتي بايد در اولويت قرار بگيرد که مجموع هزينه ديرکرد پس‌نيازهاي آن بزرگ‌تر باشد. بنابراين ما از تابع مجموع وزني شناوري آزاد فعاليت‌ها استفاده خواهيم کرد، به طوري که وزن شناوري آزاد هر فعاليت، معادل با هزينه يك واحد ديرکرد پس‌نيازهاي آن در نظر گرفته شود. از سوی ديگر، هر واحد شناوري آزاد اضافه براي يك فعاليت خاص نبايد مطلوبيت يکساني نسبت به شناوري‌هاي قبلي داشته باشد. چرا که، تخصيص شناوري آزاد به فعاليت‌ها تا حدي مورد نياز خواهد بود و بيش از آن به‌کار نخواهد آمد. بنابراين، هر واحد شناوري آزاد مطلوبيت کمتري نسبت به واحد قبلي تخصيص يافته خواهد داشت. براى مثال اگر فرض کنيم که مطلوبيت حاصل از تخصيص يك واحد شناوري آزاد به فعاليتي برابر A باشد، آنگاه مطلوبيت حاصل از تخصيص دو واحد شناوري آزاد به اين فعاليت کمتر از 2A است.

با اعمال اصلاحات بيان شده، تابع جانشين معيارهاي مقاومت به شكل رابطه ۲ توسعه داده مي‌شود. افزايش مقدار اين رابطه مي‌تواند منجر به افزايش مقاومت زمانبندي شود.

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

در اين رابطه CWS_i [۱۲] شاخصي است كه نشان‌دهنده‌ی وزن تجمعي همه پس‌نيازهاي فعاليت i است. براي درك اين مفهوم، شبكه پروژه نشان داده شده در شكل (۳) را در نظر بگيريد. هر گره و عدد بالاي آن در اين شكل به‌ترتيب نشان‌دهنده‌ی يك فعاليت پروژه و هزينه ديركرد آن فعاليت به‌ازاي هر واحد زماني است.



شكل ۳: يك شبكه پروژه براي مثال.

در جدول (۲)، شاخص CWS براي فعاليت‌هاي اين پروژه محاسبه شده است. يادآوري مي‌شود كه فعاليت‌هاي ۰ و ۸ به‌ترتيب نشان‌دهنده‌ی زمان شروع و پايان پروژه است.

جدول ۲: مقدار CWS فعاليت‌هاي مربوط به شكل ۳.

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

از آنجا كه تخصيص هر واحد شناوري آزاد به يك فعاليت خاص، مطلوبيت كمتري نسبت به واحد تخصيص يافته قبلي دارد، در رابطه ۲ از يك تابع نزولي نمايي استفاده شده است. در اين رابطه، FF_i معرف شناوري آزاد فعاليت i است. در اين مقاله علاو ه بر تابع جانشين جديد، از تابع جانشين مقاله الفازان [۱۴] نيز استفاده شده است. اين‌كار براي مقايسه عملكرد دو تابع جانشين انجام گرفته است.

- يك مدل دوهدفه

مدل ما به صورت یک مسئله بهينه‌سازي دوهدفه فرموله مي‌شود كه اهداف آن عبارتند از: كمينه‌كردن زمان ختم پروژه و بيشينه كردن مقاومت زمانبندي. تابع هدف اين مدل به صورت كمينه كردن رابطه ۳ است.

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

در اين رابطه، Z_λ نشان‌دهنده‌ی تابع هدف مدل به ازاي ضريب λ است. همچنين، Z_M و Z_R نشان‌دهنده‌ی معيارهاي مدل است كه به ترتيب معرف زمان ختم پروژه و تابع جانشين مقاومت است. ضريب λ $(0 \le \lambda \le 1)$ كه اهميت معيار زمان ختم پروژه نسبت به مقاومت زمانبندي را نشان مي‌دهد، نقش بسيار مهمي در تعيين جواب مسئله دارد. با استفاده از روش پارامتریک و با تغيير مقادير λ مي‌توان جواب‌هاي كاراي اين مسئله را به‌دست آورد. جواب A را كارا مي‌گوييم، به شرطي كه جواب ديگري كه حداقل در یک هدف بهتر از A و در ساير اهداف بدتر نباشد، يافت نشود[۱۶]. اگر $\lambda = 1$ و $\lambda = 0$ باشد، هدف اين مسئله به ترتيب معادل با كمينه‌كردن زمان ختم پروژه و بيشينه‌كردن مقاومت زمانبندي است.

از آنجا كه مقياس معيارهاي مقاومت زمانبندي و زمان ختم پروژه يكسان نیست، ممكن است جواب‌هاي حاصل از رابطه ۳ مناسب نباشد [۱۴]. براي جلوگيري از اين مشكل، معيارهاي اين مدل به طور نسبي در نظر گرفته مي‌شود؛ به طوري كه تابع Z_λ به شكل رابطه ٤ نرمال شود. در اين رابطه، W_λ نشان‌دهنده‌ی تابع هدف نرمال‌شده به ازاي ضريب λ است. همچنين، $Z_{M(0)}$ و $Z_{R(0)}$ به ترتيب معرف زمان ختم پروژه و مقاومت يك زمانبندي اوليه است. يادآوري مي‌شود كه اين تابع نرمال‌شده، بيانگر بهبود نسبي معيارها 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 يك الگوريتم جستجوي ممنوعه

نشان داده شده است كه الگوريتم جستجوي ممنوعه، يكي از مناسب‌ترين روش‌هاي حل مدل RCPSP است[۱۷]. زيربناي اين الگوريتم، همان روش جستجوي همسايگي‌ها[۱۳] است؛ در حالي كه وجه تمايز اصلي آن با روش جستجوي همسايگي‌ها اين است كه در آن امكان

پذيرش جواب‌هاي بدتر نيز در هر مرحله وجود دارد. از اين رو، اين الگوريتم در نقاط بهينه محلي [14] متوقف نخواهد شد. همچنين، در اين الگوريتم براى جلوگيري از ايجاد جواب‌هاي تكراري از ليست ممنوعه[15] استفاده مي‌شود. گلاور در رابطه با الگوريتم جستجوي ممنوعه تحقيقات زيادي انجام داده است [۱۸]. در اين مقاله براى يافتن مجموعه جواب‌هاي كاراي مدل، يك الگوريتم جستجوي ممنوعه توسعه داده مي‌شود. بخش‌هاى اصلي اين الگوريتم عبارتند از: ۱- ارائه جواب (زمانبندى) اوليه ۲- ساختار توليد همسايگي ۳- روش انتخاب جواب ۴- تنظيم عامل.

۱. ارائه زمانبندي اوليه به عنوان ورودي الگوريتم:

هر زمانبندي با استفاده از بردار $S=(s_1,s_2,...,s_N)$ توصيف مي‌شود كه در آن s_i نشان‌دهنده‌ى زمان شروع فعاليت i است. مقادير اين بردار با استفاده از روش SGS[16] تعيين مي‌شود. اين روش محور اكثر الگوريتم‌هاي ابتكاري براي حل مدل RCPSP است[۱۷]. در اين روش، فعاليت‌هاي پروژه به ترتيب يك ليست اولويتي[17] (P) در زودترين زماني كه محدوديت منابع برقرار باشد، زمانبندي مي‌شود. در واقع، ترتيب موجود در ليست P معرف اولويت فعاليت‌هاي پروژه براي زمانبندي است. بنابراين، با تعيين اين ليست مي‌توان يك زمانبندي اوليه ارائه كرد. در اين مقاله براي تعيين ليست P از شاخص CWS فعاليت‌ها استفاده مي‌شود. بدين صورت كه فعاليت‌هاي پروژه به ترتيب نزولي شاخص CWS وارد ليست P مي‌شود. البته، براى شدني‌بودن ليست اوليه P لازم است كه ترتيب اين ليست از نظر روابط پيش‌نيازي امكان‌پذير باشد. براى اين هدف بايد قبل از وارد كردن هر فعاليت در ليست P همه پيش‌نيازهاي آن وارد شده باشد. اگر ورودي روش SGS فقط ليست P باشد، زمانبندي‌هاي ايجادشده بيكاري‌هاي عمدي[18] را نخواهد داشت. تخصيص بيكاري‌هاي عمدي به يك زمانبندي، مي‌تواند باعث محافظت از زمان شروع فعاليت‌ها در مقابل تغييرات حين اجراي پروژه شود [۴]. بنابراين، ما از يك ليست بافر[19] (B) نيز براى تخصيص بيكاري‌هاي عمدي به زمانبندي استفاده مي‌كنيم. بر اين اساس، هر زمانبندي از طريق روش SGS و با استفاده از ليست‌هاي P و B توصيف خواهد شد. يادآوري مي‌شود كه خروجي روش SGS يک زمانبندي شدني است[۱۷]. عناصر ليست B به تعداد فعاليت‌هاي پروژه است و هر يك از آنها معرف مقدار بيكاري عمدي است كه به ابتداي فعاليت مربوطه اضافه مي‌شود. افزودن بيكاري‌هاي عمدي به ابتـــــداي هر فعاليت پروژه باعث شيفت پيدا كردن فعاليت‌هاي پس‌نياز آن به سمت جلو و ايجاد شناوري‌هاي آزاد براي فعاليت‌هاي پيش‌نياز آن مي‌شود.

انجام اين مورد نيز لازمه شدني بودن جواب‌ها است. يادآوري مي‌شود كه مقادير اوليه همه عناصر ليست B برابر با صفر در نظر گرفته مي‌شود.

۲. ساختار توليد همسايگي:

به مجموعه زمانبندي‌هايي كه در اثر انجام يك عمليات خاص روي زمانبندي x به دست مي‌آيد، همسايگي‌هاي زمانبندي x گفته مي‌شود. اين عمليات مي‌تواند نظير جا به جايي دو فعاليت در ليست اولويتي باشد. براي هر يك از ليست‌هاي P و B يک نوع مجموعه همسايگي تعريف مي‌شود. هر همسايگي ليست P با جا به جايي دو عنصر متوالي آن ايجاد مي‌شود. در اين حالت، ساير عناصر اين ليست ثابت باقي مي‌ماند. قابل ذكر است كه براى شدني ماندن جواب‌ها نبايد براي عناصر داراي روابط پيش‌نيازي، جا به جايي انجام گيرد. بنابراين، مجموعه همسايگي ليست P حداكثر $N-1$ عضو دارد. هر همسايگي ليست B با افزودن يك واحد بافر زماني به يكي از عناصر آن ايجاد مي‌شود. در اين حالت نيز ساير عناصر اين ليست ثابت باقي مي‌ماند. بنابراين، مجموعه همسايگي ليست B حداكثر N عضو دارد. در اين الگوريتم، مجموعه همسايگي‌ها ابتدا براي ليست P و پس از انتخاب جواب، براي ليست B ايجاد خواهد شد.

۳. روش انتخاب جواب:

براي كاهش احتمال ايجاد جواب‌هاي تكراري، براي ليست P يک ليست ممنوعه در نظر گرفته شده است. پس از انتخاب جواب جديد، جا به جايي مربوطه وارد اين ليست مي‌شود. بنابراين، هر عنصر ليست ممنوعه شامل يک جفت فعاليت است. اگر طول ليست ممنوعه برابر L باشد، با ورود عنصر $L+1$ به آن ليست، اولين عنصر آن حذف و عنصر $L+1$ به عنوان آخرين عنصر وارد ليست ممنوعه مي‌شود. از بين مجموعه همسايگي ليست B، همسايگي كه حداقل مقدار W_λ را داشته باشد(رابطه ۴)

به عنوان جواب جديد انتخاب خواهد شد. در حالي که از بين مجموعه همسايگي مربوط به ليست P، همسايگي که حداقل مقدار W_λ را داشته باشد، به شرطي انتخاب خواهد شد که حداقل يکي از دو شرط زير را داشته باشد:

۱. نداشتن تعلق جفت فعاليت مورد نظر به ليست ممنوعه

۲. داشتن کمترين مقدار W_λ در کل مراحل الگوريتم

در غير اين صورت، اگر هيچ يك از شرايط بالا برقرار نباشد، آنگاه اين شرايط از بين ساير همسايگي‌ها براي همسايگي که حداقل مقدار W_λ را دارد، بررسي مي‌شود.

۴- تنظيم عامل:

کيفيت جواب‌هاي حاصل از الگوريتم‌هاي فرا ابتکاري[۲۰] و بخصوص الگوريتم جستجوي ممنوعه تا حد زيادي بستگي به تنظيم عوامل دارد [۱۸]. در الگوريتم جستجوي ممنوعه بايد مقادير سه عامل تنظيم شود. اين عوامل عبارتند از: طول ليست ممنوعه، تعداد اعضاي يك مجموعه همسايگي و تعداد مراحل تکرار الگوريتم (شرط توقف). ما براي هر يك از اين عوامل مقادير مختلفي در نظر گرفته‌ايم که اين مقادير در جدول (۳) نشان داده شده است. در اين جدول، N نشان‌دهنده‌ی تعداد فعاليت‌هاي پروژه و علامت [] نشان‌دهنده‌ی جزء صحيح مقادير است.

جدول ۳: مقادير پارامترهاي الگوريتم جستجوي 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 براى تعيين مقادير مناسب اين عوامل، ۱۰۰ مسئله تصادفي را با همه ترکيب‌هاي جدول (۳) حل کرده‌ايم. نحوه حل و توليد اين مسائل در بخش ۴ گزارش شده است. بر اساس نتايج حاصله، مقادير مناسب اين عوامل به اين شکل است: (قابل ذکر است که هر يك از اين نتايج با ثابت نگه داشتن مقادير ساير عوامل به دست آمده است)

- ✓ افزايش طول ليست ممنوعه از $[\sqrt{N}]$ به $[N/2]$ باعث بهبود جواب‌ها شده است، ولي با افزايش آن به مقدار N، بهبود قابل توجهي حاصل نشده است. بنابراين، طول ليست ممنوعه برابر $[N/2]$ در نظر گرفته مي‌شود.
- ✓ افزايش تعداد اعضاي مجموعه همسايگي‌ها همـــواره باعث بهبود جواب‌ها شده است. بنابراين، تعداد اعضاي مجموعه همسايگي ليست‌هاي P و B به ترتيب برابر $N-1$ و N در نظر گرفته مي‌شود. يادآوري مي‌شود که اين مقادير بيانگر حداکثر تعداد همسايگي ممکن براي هر ليست است.
- ✓ افزايش مراحل تکرار بدون بهبود از ۵ به ۱۰ اغلب باعث بهبود جواب‌ها شده است. ولي با افزايش آن به ۲۰، بهبود قابل توجهي در جواب‌ها حاصل نشده است. بنابراين شرط توقف اين الگوريتم را نبود بهبود جواب‌ها در ۱۰ مرحله متوالي آن در نظر مي‌گيريم.

❖ قالب کلي الگوريتم:

گام ۱) تعيين ضريب λ و ليست‌هاي P و B

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

گام ۳) ايجاد يك مجموعه همسايگي براي ليست P

گام ۴) محاسبه مقدار تابع هدف براي همه همسايگي‌ها

گام ۵) انتخاب جواب و به‌هنگام کردن ليست ممنوعه

گام ۶) ايجاد يك مجموعه همسايگي براي ليست B

گام ۷) محاسبه مقدار تابع هدف براي کليه همسايگي‌ها

گام ۸) انتخاب جواب

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

گام ۱۰) انتخاب بهترين جواب

روش تعيين مقادير λ در بخش بعدي، گزارش شده است. اين الگوريتم به ازاي جميع مقادير λ اجرا شده و با حذف جواب‌هاي مغلوب[۲۱] از مجموعه جواب‌هاي به دست آمده، مجموعه‌اي از جواب‌هاي کارا ايجاد مي‌شود.

آزمايش‌های محاسباتي و تحليل نتايج

- توليد مسائل مناسب

الگوريتم مطرح‌شده به وسيله زبان برنامه‌نويسي C# کدنويسي شده است. بدين روش، حل مسائل زمانبندي پروژه با استفاده از يک کامپيوتر شخصي Pentium IV با پردازشگر ۳/۲ گيگا هرتز انجام گرفته است. همه مسائل مورد آزمايش در اين مقاله به طور تصادفي و با استفاده از نرم‌افزار RANGEN II که يکي از کاراترين نرم‌افزارهاي توليد مسائل زمانبندي پروژه است، ايجاد شده است [۱۹].

در اين نرم‌افزار، امكان تعيين مقادير چندين عامل پروژه وجود دارد. برخي از اين عوامل مربوط به منابع و برخي ديگر مربوط به ساختار شبكه پروژه است. عوامل اصلي اين نرم‌افزار عبارتند از: تعداد فعاليت‌هاي پروژه، فشردگي روابط پيش‌نيازي، فاكتور منابع[۲۲] و محدوديت منابع[۲۳]. به جز عامل اول، مقادير ساير عوامل بين صفر و يك است. هر چه مقدار عامل فشردگي روابط پيش‌نيازي بزرگ‌تر باشد، ارتباط بين فعاليت‌هاي پروژه بيشتر و در نتيجه امكان اجراي موازي آنها كمتر خواهد بود. همچنين، هر چه مقدار عامل فاكتور منابع بزرگ‌تر باشد، تنوع منابع مورد استفاده در فعاليت‌ها بيشتر خواهد بود. براى مثال اگر مقدار اين عامل براي يك پروژه برابر ۰/۵ باشد، آنگاه براي اجراي هر يك از فعاليت‌ها به طور متوسط نيمي از انواع منابع به‌كار برده خواهد شد. از سوي ديگر، هر چه مقدار عامل محدوديت منابع بزرگ‌تر باشد، متوسط استفاده هر نوع منبع براي اجراي هر يك از فعاليت‌ها بيشتر خواهد بود. براي انجام آزمايش‌های محاسباتي، مقادير مختلفي براي هر يك از اين عوامل در نظر گرفته شده است كه اين مقادير در جدول (۴) نشان داده شده است. هدف از اين كار، حفظ تنوع مسائل و ايجاد انواع پروژه‌ها با ساختارهاي متفاوت است. اعداد درون پرانتز بيانگر كد مربوط به مقدار هر عامل است. از آنجا كه براي هر يك از عوامل سه مقدار مختلف در نظر گفته شده است، با تركيب همه مقادير مي‌توان ۸۱ نوع مسئله مختلف توليد كرد. شماره هر نوع مسئله از روش جمع كدهاي مربوط به مقادير عوامل آن به‌دست مي‌آيد. براى مثال شماره مسئله‌اي كه همه عوامل آن مقدار متوسطی دارد، ٤١ است. قابل ذكر است كه شماره مسائل در بخش بعدي به منظور تحليل نتايج استفاده خواهد شد.

جدول ۴: مقاديرعوامل 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 اين مقاله براي هر نوع مسئله، ۱۰ مسئله تصادفي توليد شده است. بنابراين، در مجموع ۸۱۰ مسئله مورد آزمايش قرار مي‌گيرد. توليد اين مسائل با ۴ نوع منبع تجديدشدني و با سطح دسترسي ۱۰ واحد در طول زمان انجام گرفته است. وزن ديركرد همه فعاليت‌ها يكسان و برابر واحد در نظر گرفته شده است. قابل ذكر است كه موعد تحويل هر پروژه برابر $[1.3Z_M^{best}]$ در نظر گرفته مي‌شود [۱۱]. Z_M^{best} معرف كمترين زمان ختم پروژه است كه اين مقدار از راه حل مسئله با ضريب $\lambda=1$ به دست مي‌آيد. همه مسائل علاوه بر تابع جانشين جديد با استفاده از تابع جانشين مقاله الفازان [۱۴] نيز حل مي‌شود. مقايسه عملكرد اين دو تابع با استفاده از آزمايش‌های شبيه‌سازي انجام شده است. شبيه‌سازي‌ها با در نظر گرفتن نبود قطعيت زمان اجراي فعاليت‌ها انجام گرفته است. احتمال افزايش زمان اجراي هر فعاليت پروژه برابر ۰/۱ و مقدار افزايش آن برابر جزء صحيح درصدي تصادفي از زمان اجراي آن فعاليت در نظر گرفته شده است. براي جواب مربوط به هر تابع جانشين به ازاي هر مقدار λ، ۱۰۰ بار شبيه‌سازي صورت گرفته است. مقادير مختلف λ به شكل رابطه‌ی ۵ است.

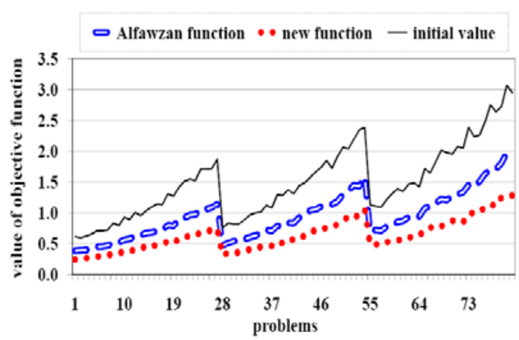
$$\lambda = 1-0.05j \quad , j\in\{0,1,...,9\} \qquad (5)$$

- تحليل نتايج

مسائل مورد آزمايش در اين مقاله به ترتيب شماره، حل و شبيه‌سازي شده است. يادآوري مي‌شود كه براي هر مسئله، با استفاده از هر يك از توابع جانشين يك جواب به‌دست مي‌آيد كه هر يك از اين جواب‌ها با دو معيار مقاومت شبيه‌سازي مي‌شود. در صورت ثابت ماندن ساير عوامل پروژه، هر چه تعداد فعاليت‌ها بيشتر باشد احتمال اختلال در زمانبندي بيشتر خواهد بود. از اين رو، مقادير توابع مربوط به معيارهاي مقاومت به طور نسبي در نظر گرفته شده است. به عبارت ديگر، مقادير توابع هدف مربوط به معيارهاي مقاومت براي هر پروژه بر تعداد فعاليت‌هاي آن تقسيم مي‌شود. در اين آزمايش‌ها براي هر مسئله، مقادير تابع هدف به ازاي جواب اوليه نيز به دست آمده است. بدين روش، ميزان كارايي الگوريتم جستجوي ممنوعه ارزيابي مي‌شود.

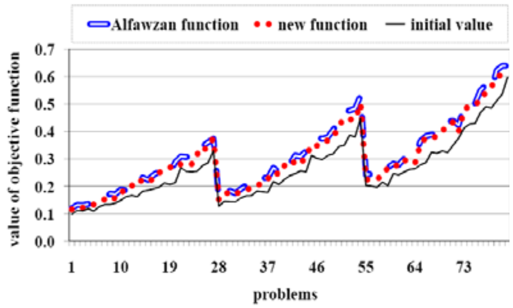
با استفاده از نتايج نشان داده شده در شكل (۴)، عملكرد تابع جانشين مقاله الفازان و تابع جانشين جديد

در معيار مقاومت جواب مقايسه مي‌شود. اين نمودار بيانگر متوسط مقدار نسبي رابطه ۱ براي مسائل مختلف و به ازاي همه مقادير λ است. همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، الگوريتم ما با استفاده از هر دو تابع جانشين منجر به بهبود جواب از نظر معيار مقاومت جواب مي‌شود. البته، تابع جديد همواره جانشين بهتري براي اين معيار است. در صورت حل مسائل با استفاده از تابع جانشين جديد، اين الگوريتم به طور متوسط منجر به ۱۳۷درصد بهبود نسبت به جواب اوليه شده است. اين مقدار با استفاده از تابع جانشين الفازان برابر با ۵۷درصد است. با توجه به شماره مسائل، اختلاف عملکرد دو تابع جانشين با افزايش مقدار عوامل اغلب افزايش يافته است. در اين نمودار، دو کاهش آني در نقاط تغيير تعداد فعاليت‌ها وجود دارد. اين مورد به دليل کاهش مقدار ساير عوامل پروژه به وجود آمده است. نشان داده مي‌شود که مقدار عوامل به ازاي هر دو تابع جانشين در معيار مقاومت جواب تأثيرگذار است. اين مورد را بدين شکل نيز مي‌توان توجيه کرد که با افزايش مقدار عوامل امکان زمانبندي موازي فعاليت‌ها کاهش مي‌يابد؛ از اين رو افزايش زمان اجراي فعاليت‌ها با احتمال بيشتري منجر به اختلال در فعاليت‌هاي پس‌نياز خواهد شد.



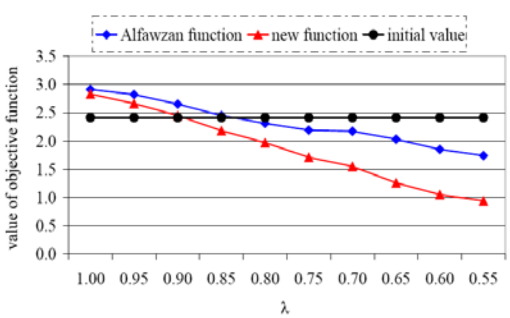
شکل ۴: عملکرد دو تابع جانشين در معيار مقاومت جواب.

با استفاده از نتايج نشان‌داده‌شده در شکل ۵، عملکرد تابع جانشين مقاله الفازان و تابع جانشين جديد در معيار مقاومت کيفي مقايسه مي‌شود. متوسط مقدار تابع هدف در اغلب مسائل براي هر دو تابع جانشين به طور تقريبی يکسان است. بنابراين تابع جديد به عنوان جانشين معيار مقاومت کيفي، برتري چنداني نسبت به تابع الفازان ندارد. جالب است که الگوريتم ما باعث تضعيف جواب‌ها از نظر معيار مقاومت کيفي نسبت به جواب اوليه شده است. اين مورد به دليل تخصيص بيکاري‌هاي عمدي به وجود آمده است. چرا که، وجود بافرهاي زماني بين فعاليت‌ها باعث به تعويق افتادن زمان ختم پروژه و در نتيجه افزايش احتمال تجاوز از موعد تحويل آن مي‌شود.



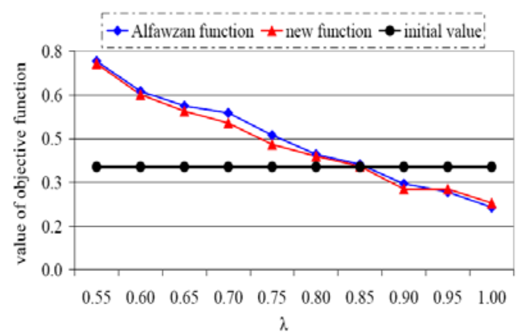
شکل ۵: عملکرد دو تابع جانشين در معيار مقاومت کيفي.

با استفاده از نتايج نشان‌داده‌شده در شکل (۶)، عملکرد دو تابع جانشين در معيار مقاومت جواب بر اساس ضريب λ مقايسه مي‌شود. به ازاي هر مقدار λ تابع جديد همواره جانشين بهتري براي معيار مقاومت جواب است. همچنين، اختلاف عملکرد دو تابع جانشين با کاهش مقدار λ افزايش مي‌يابد. بدين معنا که هر چه اهميت معيار مقاومت جواب بيشتر باشد، تفاوت اين دو تابع چشم‌گيرتر است. ضريب λ به ازاي هر دو تابع جانشين در معيار مقاومت جواب تأثيرگذار است. اين مورد را بدين صورت مي‌توان توجيه کرد که با کاهش مقدار λ امکان تخصيص بافرهاي زماني بيشتر شده و در نتيجه زمان شروع فعاليت‌ها کمتر دچار اختلال مي‌شود. جالب است که براي مقادير بالاي λ، الگوريتم باعث تضعيف جواب‌ها از نظر معيار مقاومت جواب شده است، در حالي که کارايي آن با کاهش مقدار λ افزايش مي‌يابد.



شکل ۶: عملکرد دو تابع جانشين در معيار مقاومت جواب بر اساس ضريب λ.

بـا اسـتفاده از نتـايج نشـان‌داده‌شـده در شـكل (۷)، عملكرد دو تابع جانشين در معيار مقاومت كيفي بر اساس ضريب λ مقايسه مي‌شود. مشاهده مي‌كنيد كـه بـه ازاي هر مقدار λ متوسط مقدار تابع هدف در اغلب مسائل بـه طور تقريبی يكسان است. در اين نمـودار نيـز نشـان داده مي‌شود كه تابع جديد به عنوان جانشـين معيـار مقاومـت كيفي، برتري چنداني نسبت به تابع الفازان ندارد. مشاهده مي‌كنيد كه با افزايش مقدار λ مقادير مربـوط بـه معيـار مقاومت كيفي بهبود مي‌يابد. در حالي كه افـزايش ضـريب λ بيانگر اهميت بيشتر براي زمان ختم پـروژه و اهميـت كمتر براي معيار مقاومت كيفي است. ايـن تضـاد را بـدين صورت مي‌توان توجيه كرد كه با افزايش مقدار λ امكـان تخصيص بافرهـاي زمـاني كمتـر و در نتيجـه زمـان خـتم زمانبندي كوتاه‌تر مي‌شود. براي مقادير بزرگ λ، الگوريتم ما باعث بهبـود جـواب‌هـا از نظـر معيـار مقاومـت كيفـي مي‌شود. البتـه، كـارايي آن بـا كـاهش مقـدار λ كـاهش مي‌يابد.



شكل ۷: عملكرد دو تابع جانشين در معيار مقاومت كيفي بر اساس ضريب λ .

نتايج آزمايش‌ها نشان داد كه در يك مسئله، اسـتفاده از توابع جانشين مختلف براي معيار مقاومت مي‌تواند منجر به كسب جواب‌هايي با مقاومت متفاوت شود؛ در حالي كـه زمان ختم اين جـواب‌هـا تفـاوت چنـداني بـا هـم نـدارد. حداكثر اخـتلاف زمـان خـتم در كليـه مسـائل و ضـرايب مختلف λ برابر ۴درصد است.

جمع‌بندي

در اين مقاله، يك مدل دوهدفه براي مسئله زمانبندي پروژه با محدوديت منابع در نظر گرفته شده است. مقاومت زمانبندي و زمان ختم پروژه به عنوان دو هدف ايـن مـدل مطرح است. برای حل مدل، يك تابع جانشين جديد براي معيارهاي مقاومت توسعه داده شده است. همچنـين، يـك الگوريتم جسـتجوي ممنوعـه نيـز بـرای ايجـاد مجموعـه جواب‌هاي كاراي مدل توسعه داده شد. پـس از كدنويسـي الگوريتم، تعداد زيادي مسئله تصادفي با استفاده از آن حل شده است. برای ارزيابي عملكرد الگوريتم و توابع جانشين مقاومت، آزمايش‌های محاسباتي گسترده‌اي بـا اسـتفاده از شبيه‌سازي انجام گرفته اسـت. نشـان داده شـد كـه تـابع جانشين جديد در معيار مقاومـت جـواب بـر تـابع الفـازان چيرگي داشته و نيـز بـا كـاهش ضـريب λ ايـن چيرگـي افزايش مي‌يابد. اگر چه، در معيـار مقاومـت كيفـي بهبـود قابل توجهي حاصل نشده است.بنابراين، با توجه بـه معيـار مقاومت جواب استفاده از تابع جانشين جديـد قابـل دفـاع است. همچنين، تخصيص بافرهـاي زمـاني بـه فعاليـت‌هـا مي‌تواند منجر به بهبود زمانبندي از لحاظ معيـار مقاومـت جواب شود، ولي اين كار سبب تضـعيف زمانبنـدي از نظـر معيار مقاومت كيفي خواهد شد.

اين مورد بر نتـايج حاصـل از رويكـرد CC/BM نيـز صحه مي‌گذارد. بنابراين، اين الگوريتم براي معيار مقاومت كيفي غيركارا و بـراي معيـار مقاومـت جـواب كـارا اسـت. توسعه ساير توابع جانشين براي معيارهـاي مقاومـت مـي-تواند يک موضوع تحقيقاتي جالب براي آينده 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.

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.

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.

واژه‌هاي انگلیسي 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